

TRAVAUX SUR EXISTANT

Techniques

L'intérêt des isolants thermiques biosourcés
en réhabilitation énergétique

SOPHIE TRACHTE et DOROTHÉE STIERNON..... 3



Publier un article

Vous pouvez solliciter la rédaction pour publier un article ; il sera alors examiné par le comité scientifique qui jugera s'il respecte la ligne éditoriale. Pour obtenir de plus amples renseignements, envoyer un courriel à clement.plantureux@infopro-digital.com.

Pour faire référence à un article

La mention abrégée des *Dossiers techniques de la construction* est DTC. Un article peut être cité comme suit : Auteur(s), « Titre de l'article », DTC, mois, année, page(s).

[Consultez ce numéro et les archives sur Kheox.fr](#)



Pour un **essai gratuit sans engagement**,

► Appelez le 04 66 68 96 97 ou scannez ce QR code
moniteurjuris@infopro-digital.com

CODE
GÉNÉRAL
DES
COLLECTIVITÉS
TERRITORIALES

LES DOSSIERS
Collectivités
Territoriales



L'intérêt des isolants thermiques biosourcés en réhabilitation énergétique

La transition environnementale constitue un enjeu majeur pour le secteur du bâtiment, qui représente près de 40 % des consommations énergétiques annuelles et génère 20 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), en France comme dans la plupart des pays européens. Dans ce contexte, les matériaux isolants biosourcés s'imposent comme des solutions intéressantes, alliant la réduction de l'impact environnemental, la valorisation de ressources locales et renouvelables, et, pour la plupart, de bonnes performances thermiques. Ces isolants constituent également une bonne réponse aux enjeux de la réhabilitation du bâti ancien, grâce à leur compatibilité avec le comportement hygrothermique spécifique de ces constructions et au respect de leur valeur patrimoniale et culturelle. Cet article vise à analyser et comparer, de manière approfondie, ces différents isolants dans le cadre de l'amélioration énergétique du bâti. L'étude s'appuie à la fois sur des données issues des analyses de cycle de vie (ACV), des fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) de produits et des recherches récentes. Il met en évidence le caractère équilibré des isolants biosourcés en détaillant la nature des matériaux, les ressources mobilisées, les transformations qu'ils subissent, leurs propriétés techniques ainsi que leur impact environnemental et leur niveau de circularité.

SOMMAIRE

- 1 • Introduction
- 2 • Définition et certification des matériaux isolants biosourcés
- 3 • Nature des matériaux, ressources utilisées et transformations subies
- 4 • Propriétés techniques et positionnement des isolants biosourcés
- 5 • Applications en réhabilitation et atouts constructifs
- 6 • Le bilan environnemental des isolants biosourcés en rénovation : aller au-delà du bilan carbone
- 7 • Isolants biosourcés et économie circulaire
- 8 • Conclusion
- 9 • Références

Sophie Trachte & Dorothee Stiernon

Sophie Trachte est architecte de formation, titulaire d'un master en architecture et développement durable de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse, 2003) et d'un doctorat en art de bâtir et urbanisme (UCLouvain, 2012). Depuis 2021, elle est professeure à la faculté d'architecture de l'université de Liège, dans le domaine de la construction et rénovation écoresponsable, circulaire et régénérative, après avoir professé pendant 10 ans comme architecte collaboratrice dans le bureau Archi 2000 à Bruxelles, puis 16 ans comme chercheuse et enseignante au sein de l'équipe Architecture et Climat et de la faculté LOGI (UCLouvain).

Dorothee Stiernon est architecte (ULB, 2012) et titulaire d'un master en sciences et gestion de l'environnement (UCL, 2014). Après avoir exercé en Suisse et à Bruxelles, elle rejoint l'équipe de recherche « Architecture et Climat » (LAB, UCLouvain, 2016) où elle mène un doctorat. Elle s'implique également en tant qu'assistante pédagogique (LOGI, UCLouvain, 2017) et accompagne des projets de construction et de rénovation durables au Centre d'étude, de recherche et d'action en architecture (CERAA, 2024). En parallèle, elle est membre spécialiste « Énergie et développement durable » à la Commission royale des monuments, sites et fouilles (CRMSF, 2024).

1 Introduction

1.1 De la performance énergétique des bâtiments à la performance environnementale globale

Depuis la première directive 93/76/CEE du 13 septembre 1993 visant à limiter les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) par une amélioration de l'efficacité énergétique, le cadre réglementaire européen n'a cessé d'évoluer vers des exigences de plus en plus ambitieuses. En 2018, la directive modificative (UE) 2018/844 du 30 mai 2018 [1] a marqué un tournant en imposant aux États membres de l'Union européenne (UE) d'élaborer des *stratégies de rénovation à long terme* en vue de soutenir la transformation du parc immobilier résidentiel et non résidentiel en un parc à haute efficacité énergétique et décarboné d'ici à 2050. Cette dynamique s'inscrit pleinement dans le cadre du *Green Deal* européen, dont l'ambition, depuis 2020, est de faire de l'Europe le premier continent neutre pour le climat, en garantissant :

- la fin des émissions nettes de GES d'ici à 2050 ;
- une croissance économique dissociée de l'utilisation des ressources ;
- une transition sociale, équitable et incluant l'ensemble des citoyens pour que personne ne soit laissé de côté [2].

Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel d'orienter les investissements vers des projets et activités durables, encadrés par un système de classification des activités économiques durables appelé « taxonomie européenne » [3]. Ce règlement, entré en vigueur en 2020, définit les conditions générales qu'une activité économique doit remplir pour être considérée comme durable sur le plan environnemental. Petit à petit, les exigences mènent à une plus grande circularité et à un recours accru à des ressources renouvelables issues de la biomasse, comme

l'impose la dernière refonte de la directive (UE) 2024/1275 du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments [4], avec notamment une obligation de limiter le « carbone intrinsèque » relatif aux émissions générées par le cycle de vie des matériaux et composants d'un bâtiment en plus du « carbone opérationnel » lié aux émissions générées lors de l'exploitation du bâtiment. Ainsi, le choix des techniques constructives, des matériaux et des équipements techniques devient un enjeu central pour la décarbonation du parc immobilier sur l'ensemble de son cycle de vie.

En France, cette ambition se traduit par la réglementation environnementale RE 2020 et par le plan de rénovation énergétique des bâtiments (PREB), qui fixent des objectifs ambitieux au niveau environnemental et impliquent le recours aux produits les plus performants (écomatériaux, matériaux biosourcés ou recyclés, construction bois) [5]. Elle se traduit également, de manière plus volontaire, par le développement de labels spécifiques, comme le label « Bâtiment biosourcé » [6].

1.2 Le développement des matériaux biosourcés en Europe et leur position sur le marché

Les filières biosourcées connaissent un essor croissant en Europe, soutenu par diverses recherches [7] [8] [9] et dispositifs d'accompagnement [10] [11], ainsi que par quelques incitations financières, principalement dans le cadre des stratégies de rénovation à long terme des États membres. Le développement de labels environnementaux, tels que « Produit biosourcé » ou « DIN-Geprüft biobased », contribue à structurer et à valoriser ces filières émergentes.

Selon l'Ademe [12], les matériaux biosourcés sont aujourd'hui majoritairement utilisés comme matériaux d'isolation. Ils se présentent sous différentes formes, notamment en vrac, en laine de remplissage, en matelas ou en panneaux semi-rigides ou rigides.

Contrairement à d'autres types de matériaux d'isolation, la plupart des matériaux biosourcés présentent à la fois une faible conductivité thermique (valeur λ d'environ 0,04 W/m.K) et une performance hygroscopique élevée alliant une grande perméabilité à la vapeur d'eau et une capacité de régulation de l'humidité. Bien utilisées, ces propriétés sont particulièrement intéressantes pour la rénovation des bâtiments

anciens, pour lesquels il est nécessaire d'assurer la continuité des transferts d'humidité dans les murs [13]. Cependant, le caractère renouvelable de ces matériaux ainsi que leur capacité à stocker du carbone ne garantissent pas nécessairement un faible impact environnemental ni une réelle circularité. Il est donc essentiel d'évaluer leur cycle de vie complet. Par exemple, bien que l'isolant en fibres de coton (non recyclé) soit un matériau biosourcé, sa culture est fortement consommatrice d'eau et de pesticides, ce qui peut en limiter l'intérêt environnemental.

En 2021, les isolants biosourcés représentent 11 % du marché, portés notamment par la ouate de cellulose, qui atteint à elle seule 20 % de parts de marché dans l'isolation des combles perdus [14].

Les isolants biosourcés sur le marché actuel sont divisés en trois catégories : les matériaux d'origine animale, les matériaux d'origine végétale et les matériaux issus de filières de recyclage.

1.3 Types de bâtis à rénover en priorité

En Europe, la surface bâtie est constituée à 75 % de bâtiments résidentiels, dont 64 % sont des maisons unifamiliales, pour la plupart construites avant 1960 et dépourvues d'isolation. La rénovation de ce parc bâti constitue ainsi une priorité stratégique pour de nombreux pays européens, particulièrement pour la France et la Belgique, qui présentent un parc résidentiel majoritairement ancien, construit avant 1945 et peu performant d'un point de vue énergétique [15] (tab. 1).

Dans l'analyse de ce parc existant, une distinction doit être faite entre les bâtiments construits avant le premier choc pétrolier de 1973 et, plus particulièrement, la première réglementation énergétique de 1975, et ceux construits après, généralement considérés comme plus performants d'un point de vue thermique. Dans le parc bâti d'avant 1975, une autre distinction est à noter entre le bâti construit sur la base de matériaux et techniques dits « traditionnels » [17], tels que les murs massifs en briques de terre cuite ou en moellons de pierre, les charpentes bois ou les enduits à la chaux, et celui construit à partir de matériaux et techniques dits « industrialisés » [18], comme le béton armé, la brique creuse et les enduits de ciment. La date charnière entre ces deux types de bâtis se situe aux alentours de 1945, même si l'entre-deux-guerres jouera aussi un rôle dans ce changement de paradigme [19].

▲ Tab. 1. Part des logements (maisons individuelles et appartements) construits avant 1970 en France et en Belgique (sources : France : Le Laboratoire de l'immobilier [16] ; Belgique : Statbel [125]).

Territoire	Maisons individuelles			Appartements		
	Avant 1918	De 1919 à 1945	De 1946 à 1970	Avant 1919	De 1919 à 1945	De 1946 à 1970
France	16 %	10 %	17 %	9 %	8 %	28 %
Wallonie	30 %	9 %	9 %	0,1 %	0,06 %	0,4 %

Ainsi, le bâti construit avant 1945, communément appelé « bâti ancien » ou « bâti traditionnel », est considéré comme peu performant d'un point de vue énergétique. Il constitue dès lors une cible prioritaire des réglementations relatives à la performance énergétique et des stratégies de rénovation à long terme initiées par l'UE. Il se caractérise, tant en France qu'en Belgique et plus largement en Europe, par certaines particularités constructives qui lui confèrent un comportement hygrothermique spécifique et doivent être prises en compte lors de la rénovation énergétique, à savoir :

- des murs de façade présentant une épaisseur importante (entre 30 et 60 cm) et constitués de briques pleines ou de moellons de pierre naturelle rejointoyés au mortier de chaux. Certains bâtiments très anciens présentent également des parois en pans de bois garnis soit de torchis, soit de briques ;
- des charpentes de toiture et de plancher constituées d'éléments en bois (fermes, pannes, chevrons, gîtage). Si les essences de bois varient en fonction des régions, le chêne, le châtaignier, le peuplier et parfois le tilleul sont les plus répandus dans le bâti le plus ancien, tandis que les bois résineux dominent dans les constructions de la fin du XIX^e siècle ;
- des dalles en contact avec le sol, généralement placées sur un système « hérisson »⁽¹⁾ constitué de plusieurs couches de granulats ;
- des parois, des composants et des matériaux généralement ouverts, dans leur ensemble, à la diffusion de vapeur d'eau.

1.4 Rénovation énergétique et choix d'un isolant thermique : une approche multicritère pour une solution adaptée

Le choix d'un isolant ne peut se fonder sur sa seule performance thermique, mais doit être pensé en fonction de plusieurs paramètres complémentaires et adapté à sa situation dans le bâtiment [13]. Évidemment, les autres caractéristiques techniques, telles que sa capacité thermique massique (déphasage pour le confort d'été), sa perméabilité à la vapeur d'eau (μ), sa facilité de mise en œuvre ou sa compatibilité avec l'existant, sont des facteurs également très importants, sans oublier son coût, qui est souvent le premier frein évoqué. Au vu des enjeux actuels, il est également nécessaire de s'intéresser à son impact environnemental tout au long de son cycle de vie, ainsi qu'à son caractère circulaire.

L'ensemble de ces aspects constitue les bases d'une approche multicritère indispensable en rénovation énergétique, permettant la sélection de solutions adaptées non seulement au bâti

⁽¹⁾ Une fondation traditionnelle en hérisson est constituée d'une couche de graviers ou de cailloux d'environ 25 cm d'épaisseur, disposée sur un sol en terre battue et servant d'assise à une dalle sur terre-plein. À l'origine, le hérisson était formé à l'aide de pierres dressées à la verticale ou sur « chant ». Ce hérisson assure la stabilité de l'assise, répartit les charges, et surtout, empêche les remontées d'humidité par capillarité grâce à l'air circulant entre les cailloux.

étudié, mais également à son contexte social, économique et environnemental [20]. Certains aspects techniques, liés à l'état de conservation du bâtiment, sa matérialité, son comportement physique et ses spécificités patrimoniales, reposent sur une étape de diagnostic préalable à toute intervention [13].

2 Définition et certification des matériaux isolants biosourcés

2.1 Matériau isolant thermique

Un matériau de construction est défini [21] comme « isolant thermique » lorsque son coefficient de conductivité thermique (λ) à l'état sec est inférieur ou égal à 0,065 W/m.K.

Un isolant thermique, dans sa diversité de nature et de forme, est principalement utilisé, dans la conception de l'enveloppe du bâtiment, pour limiter les transferts de chaleur entre l'extérieur et les espaces intérieurs. Il contribue à réduire les pertes de chaleur par transmission et ventilation, offrant ainsi une protection contre le froid et le gel en hiver, et contre la chaleur en été. De plus, il limite, tout au long de l'exploitation du bâtiment, la consommation énergétique pour le chauffage en hiver et en mi-saison, ainsi que pour la climatisation en été.

En rénovation comme en construction neuve, l'isolant thermique peut également remplir plusieurs autres fonctions visant à améliorer le confort thermique, à garantir un climat intérieur agréable et sain, mais aussi à assurer une meilleure acoustique et/ou une protection contre le feu et l'incendie.

2.2 Matériau isolant biosourcé

Dans la large gamme des isolants thermiques, les matériaux « biosourcés » se distinguent par le recours, dans leur processus de fabrication, à des matières premières naturelles d'origine végétale ou animale dérivées de la biomasse.

Selon la norme NF EN 16575 [22], le terme « biosourcé » signifie « issu partiellement ou entièrement de la biomasse ». Le terme « biomasse » implique la notion de matière première biologique, excluant ainsi celles dérivées des formations géologiques et/ou fossilisées.

La biomasse est dite « renouvelable » dans la mesure où elle est produite de manière continue par des végétaux et/ou des animaux sur des temps plus courts que la durée de vie d'un être humain. Son cycle de vie est défini comme étant « circulaire » puisqu'à l'état naturel, elle est biodégradable et peut être compostée. La biomasse est aussi considérée comme un puits de carbone. Lors du phénomène de photosynthèse – processus bioénergétique nécessaire à la croissance des végétaux –, le CO₂ présent dans l'atmosphère est capté par ceux-ci, puis synthétisé à l'aide de l'eau absorbée par les racines et de l'énergie solaire captée par les feuilles pour produire des glucides contenant du

carbone biogénique. Contrairement à la lithosphère, qui ne réintègre que très lentement du carbone, la biomasse capte à peu près autant de CO₂ pendant sa croissance qu'elle en libère au moment de sa décomposition.

Cependant, dans une vision large de gestion écoresponsable des ressources, le terme « biosourcé » peut être élargi à la fois aux matériaux géosourcés issus de ressources minérales, tels que la terre crue ou la pierre naturelle, et à certains matériaux issus de la revalorisation de déchets. En effet, ces matériaux sont le plus souvent locaux, peu transformés, présentent un impact très modéré sur les émissions de GES et s'inscrivent dans une logique d'économie circulaire.

Un matériau isolant thermique biosourcé peut ainsi être défini comme un matériau isolant thermique produit à partir de ressources végétales et animales issues de la biomasse, de ressources minérales peu ou pas transformées et/ou de matières issues de la revalorisation de produits « post-consommation » initialement fabriqués à partir de ressources biosourcées.

2.3 Fibres végétales

La plupart des isolants biosourcés étant produits à partir de fibres végétales, il convient également de préciser ce que recouvre le terme de « fibre végétale ».

Selon le mémento des marchés « Fibres végétales à usages de matériaux en France » [23], une fibre végétale correspond à la paroi secondaire d'une cellule végétale morte, majoritairement constituée de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Elle peut se présenter sous forme isolée, dite « fibre unitaire », ou associée à d'autres fibres au sein d'un « faisceau fibreux ».

L'utilisation des fibres végétales dans le domaine de la construction (à l'exception notable des pailles ou des balles de céréales) requiert leur extraction préalable à partir de la plante par un procédé de défibrage. Cette étape est suivie d'un traitement visant à leur conférer une morphologie adaptée aux exigences

des applications visées. Les fibres ainsi obtenues sont désignées sous le terme de « fibres végétales techniques » [23] [24]. Les fibres végétales techniques issues des processus de défibrage et de préparation peuvent être divisées en six sous-classes, selon leur dimension : fibres longues ou décimétriques, fibres moyennes ou centimétriques, fibres courtes ou millimétriques, granulats, farines, et poudres.

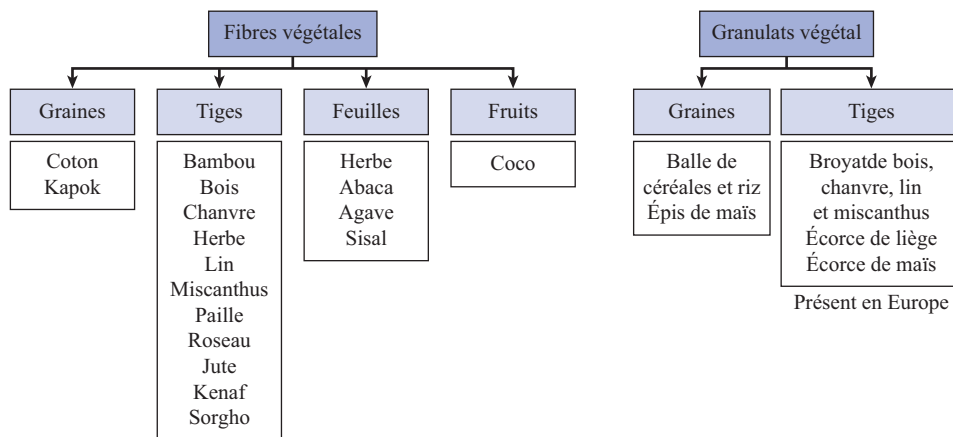
Dans le cas des isolants biosourcés, les fibres et les granulats sont principalement utilisés (fig. 1).

2.4 Isolants biosourcés et teneur en contenu biosourcé

La norme NF EN 16575 de 2014 [22] ne spécifie pas précisément ce qu'elle entend par « matériau issu partiellement de la biomasse ». Cela signifie que des matériaux dits « biosourcés » peuvent contenir des quantités de matières biosourcées très variables. Il est donc essentiel de pouvoir caractériser et signaler la quantité de biomasse contenue dans chaque produit ou matériau, par le biais de sa teneur biosourcée ou de sa teneur en carbone biogénique.

La norme NF EN 16785-1 de 2016 [25] propose une méthode pour déterminer la teneur biosourcée à l'aide du radiocarbone et de l'analyse élémentaire. Si cette méthode s'applique à une large gamme de produits – dont les matières premières, les produits chimiques et les produits finis, semi-finis ou intermédiaires –, elle ne fixe pas non plus de seuil minimal permettant de qualifier un matériau de « biosourcé ».

La norme NF EN 16640 publiée en 2017 [26] propose une méthode de calcul pour mesurer le contenu en carbone biosourcé. Selon cette norme, celui-ci s'exprime en fraction de la masse de l'échantillon ou en fraction du contenu total en carbone. Si cette méthode s'applique à tous les produits contenant du carbone organique, aucun seuil minimal n'est toutefois défini pour qualifier un matériau de « biosourcé ».



▲ Fig. 1. Liste non exhaustive de granulats et fibres végétales utilisés dans la production d'isolants thermiques (source : S. Trachte).

▲ Tab. 2. Présentation des scores (bronze, argent et or) à obtenir en fonction de la teneur en contenu biosourcé en masse pour le label « Produit biosourcé » et des indications complémentaires relatives aux ressources utilisées (source : Label Produit Biosourcé [126]).

Niveau			Filière		Part recyclée
Bronze	Argent	Or	Française	Locale	
Teneur comprise entre 10 % et 50 %	Teneur comprise entre 50 % et 70 %	Teneur comprise entre 70 % et 100 %	<ul style="list-style-type: none"> – Au moins 80 % des matières premières biosourcées doivent être soit d'origine française, soit produites ou recyclées et transformées en France – Le produit doit être fabriqué dans une usine installée sur le territoire français 	Au moins 80 % des matières premières biosourcées doivent être d'origine locale, c'est-à-dire produites ou recyclées et transformées dans un rayon géographique de 350 km autour du site de production du produit	Proportion massique de matière première issue du recyclage d'un produit fini, aussi appelée « matériau post-consommateur »

Actuellement, seul le label « Produit biosourcé », développé en 2017 par la société coopérative Karibati [27], requiert soit un pourcentage massique minimal de matières premières issues de la biomasse, défini par famille de produit, soit un pourcentage de carbone biogénique minimal par rapport au carbone total, également défini par famille de produit. Le producteur doit également répondre à plusieurs exigences de transparence, en disposant d'une déclaration environnementale de produit (DEP) et en spécifiant l'origine des matières premières biosourcées utilisées.

Le pourcentage massique de matière première biosourcée est affiché sur le logo du label, qui se décline du bronze à l'or. Le logo indique également l'origine des matières biosourcées (la filière française ou wallonne), ainsi que le contenu recyclé le cas échéant (tab. 2).

Pour les matériaux isolants thermiques, le seuil minimal d'intégration de matière biosourcée est fixé à 70 % de la masse du produit. Les isolants thermiques labellisés sont repris sur le site « Produit biosourcé » [29]. Il s'agit principalement d'isolants à base de fibres de bois, de fibres d'herbe, de fibres de chanvre, de fibres mélangées chanvre-coton-lin, de laine de mouton, de cellulose recyclée, de coton recyclé et de liège expansé.

Outre ces deux premiers labels, d'autres étiquetages « Produit biosourcé » se développent en Europe, dont le programme de certification allemande « DIN-Geprüft biobased » [30], qui évalue les produits en fonction de leur teneur en carbone biosourcé selon trois niveaux de qualité :

- de 20 à 50 % ;
- de 50 à 85 % ;
- au-delà de 85 %.

De son côté, le système autrichien de certification « OK biobased » de TÜV Austria [31] utilise une échelle allant d'une à quatre étoiles pour refléter la proportion de matière biosourcée : une étoile correspond à une teneur comprise entre 20 et 40 %, tandis que quatre étoiles indiquent une teneur supérieure à 80 %.

Si l'ensemble de ces initiatives sont fondamentales dans un contexte de raréfaction des ressources minérales, de neutralité carbone et de résilience des territoires, la teneur en matière biosourcée d'un produit ou matériau de construction ne permet cependant pas d'évaluer l'impact environnemental et/ou la durabilité du produit ou du matériau de construction. L'impact environnemental d'un produit, qu'il soit biosourcé ou conventionnel, ne peut être estimé que par le biais d'une analyse de cycle de vie (ACV) complète, s'appuyant sur les normes européennes en vigueur.

REMARQUE

Label « Produit biosourcé »

En 2017 la société coopérative Karibati a développé le label de référence « Produit biosourcé » français [32], avec pour ambition d'améliorer la visibilité et la reconnaissance des produits de construction intégrant une part significative de biomasse, en certifiant leur contenu en matière première biosourcée. Ce label vise ainsi à attester du caractère renouvelable des produits, à apporter de la transparence sur les quantités biosourcées incorporées dans les produits, à valoriser leur capacité à stocker du carbone et à promouvoir les filières courtes des matériaux de construction biosourcés.

S'alignant sur ce premier label, le Cluster Eco-construction, soutenu par l'administration de la Région wallonne en Belgique, a lancé en 2021 le label « Produit biosourcé wallon ». Ces deux labels s'accompagnent aujourd'hui d'un référentiel détaillé définissant leurs exigences et les modalités de labellisation.

REMARQUE

Label d'état « Bâtiment biosourcé »

Initié en 2012, le label « Bâtiment biosourcé » [28] définit un cadre réglementaire en France, sur base volontaire, afin de valoriser l'utilisation de matériaux d'origine biosourcée dans la construction neuve.

L'arrêté du 2 juillet 2024 [NOR : TREL2401164A] [33] a apporté quelques modifications, dont les trois niveaux de labels selon la quantité de carbone biogénique stocké (en se basant sur la méthode de l'indicateur Stock C de la RE 2020) par unité de surface et par typologie de bâtiment :

- bâtiment d'habitation ;
- bâtiments à usage industriel, de stockage ou de service de transport ;
- autres usages (autres que les deux précédents).

3 Nature des matériaux, ressources utilisées et transformations subies

Les isolants biosourcés englobent une large gamme de matériaux aux natures et formes diverses. Ces natures et ces formes influencent à la fois les performances techniques du matériau, son usage et ses applications possibles – notamment en rénovation – ainsi que son impact environnemental global.

La nature d'un matériau isolant dépend à la fois des ressources utilisées pour sa fabrication et des transformations mises en œuvre lors de son processus de production. Les isolants biosourcés, issus de la biomasse, sont classés en tant que matériaux organiques (fig. 2). Ils se distinguent à la fois des isolants organiques issus de la pétrochimie et des isolants inorganiques, issus principalement de la lithosphère (roches et minéraux). Ils sont le plus souvent considérés comme « naturels », car leurs matières premières subissent généralement peu de transformations lors de leur fabrication.

3.1 Ressources utilisées

Un matériau isolant est la plupart du temps fabriqué à partir de deux types de matières premières :

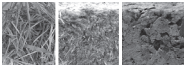
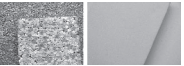
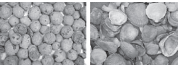
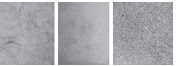
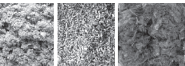
- les matières dites « dominantes », les plus importantes en masse, dont la fonction est d'assurer la ou les principales

caractéristiques du matériau fini, auquel elles donnent généralement leur nom ;

- les matières dites « secondaires ».

Les matières « dominantes » des isolants biosourcés sont en grande majorité issues de la biomasse. Ces matières proviennent essentiellement de fibres végétales, issues de différentes parties de plantes (graines, tiges, fruits ou feuilles). En Europe, la plupart des fibres végétales utilisées pour la production d'isolants biosourcés sont issues de la tige des plantes. Ces fibres végétales proviennent principalement de l'agriculture (co-produits et sous-produits) et/ou d'écosystèmes naturels tels que les forêts et les espaces verts, mais également de la valorisation de sous-produits issus d'autres secteurs économiques, comme le textile ou le papier. Certaines matières premières émanent aussi – mais dans une moindre mesure – des écosystèmes marins, comme les algues et/ou les coquillages.

Des matières « secondaires » entrent également dans la composition des isolants biosourcés. Elles sont utilisées, en tant qu'additifs, pour assurer la cohésion du produit fini (liant) et la stabilité de sa structure (fibres polyester), pour garantir la pérennité du matériau (agents hydrophobes et biocides) et/ou pour préserver la sécurité de l'utilisateur (ignifugeant). Ces matières sont pour la plupart synthétiques et issues de la pétrochimie. Selon leur nature et leur proportion dans la composition de l'isolant, elles peuvent exercer une influence significative tant sur le bilan environnemental global de celui-ci que sur son potentiel de valorisation et de recyclage.

Isolants thermiques					
Ressources utilisées	Isolants organiques		Isolants minéraux		Isolants recyclés
Fabrication et transformations subies	Naturels	Synthétiques	Naturels	Synthétiques	Issus d'autres secteurs Naturels
Famille d'isolants	 <ul style="list-style-type: none"> Balles de riz Balles de céréales Bois Chanvre Chaux-chanvre Coton Herbe Mycélium Miscanthus Laine de mouton Lin Paille de céréale Paille de riz Paille de lavande Roseau etc. 	 <ul style="list-style-type: none"> Mousse phénolique Mousse PU Polystyrène expansé Polystyrène extrudé Polyuréthane Polyisocyanurate 	 <ul style="list-style-type: none"> Argile expansée Coquillage Perlite expansée Pierre ponce Silicate de calcium Vermiculite expansée 	 <ul style="list-style-type: none"> Laine de roche Laine de verre Mousse de ciment Verre cellulaire 	 <ul style="list-style-type: none"> Cellulose Granules de papier Coton recyclé Fibres de bois recyclées

▲ Fig. 2. Familles d'isolants classées en fonction des ressources utilisées et du processus de fabrication (source : D. Stiernon et S. Trachte).

3.1.1 | Ressources végétales et animales issues de l'agriculture et de l'élevage

Si les surfaces agricoles représentent environ 12 % de la surface du globe, elles pourraient être triplées dans certaines zones géographiques, selon l'étude « Bio World Resource Benchmark » [34]. Elles couvrent 38 % du territoire européen, les principales cultures étant le blé et l'épeautre (126,8 millions de tonnes en 2023), la betterave (110,3 millions), le maïs (61,4 millions), les légumes (60 millions), les pommes de terre (48,1 millions) et l'orge (47,4 millions).

En France, les surfaces agricoles couvrent 52 % du territoire et occupent une place centrale dans la production européenne de céréales, avec 27 % de la production de blé, 23 % de celle de maïs et 17 % de celle de l'orge. Avec presque 700 000 hectares de cultures maraîchères et fruitières (y compris les vergers), la France est aussi le quatrième producteur européen de légumes et de fruits [35] [36]. C'est également le premier producteur de lin en Europe.

Les matériaux isolants biosourcés produits à partir des ressources agricoles tirent profit des matières végétales issues des cultures (fibres, cosses, balles) ou des fibres animales issues de l'élevage. Ces matières sont le plus souvent issues de sous-produits ou de co-produits, permettant ainsi une exploitation optimale de la ressource et limitant la production

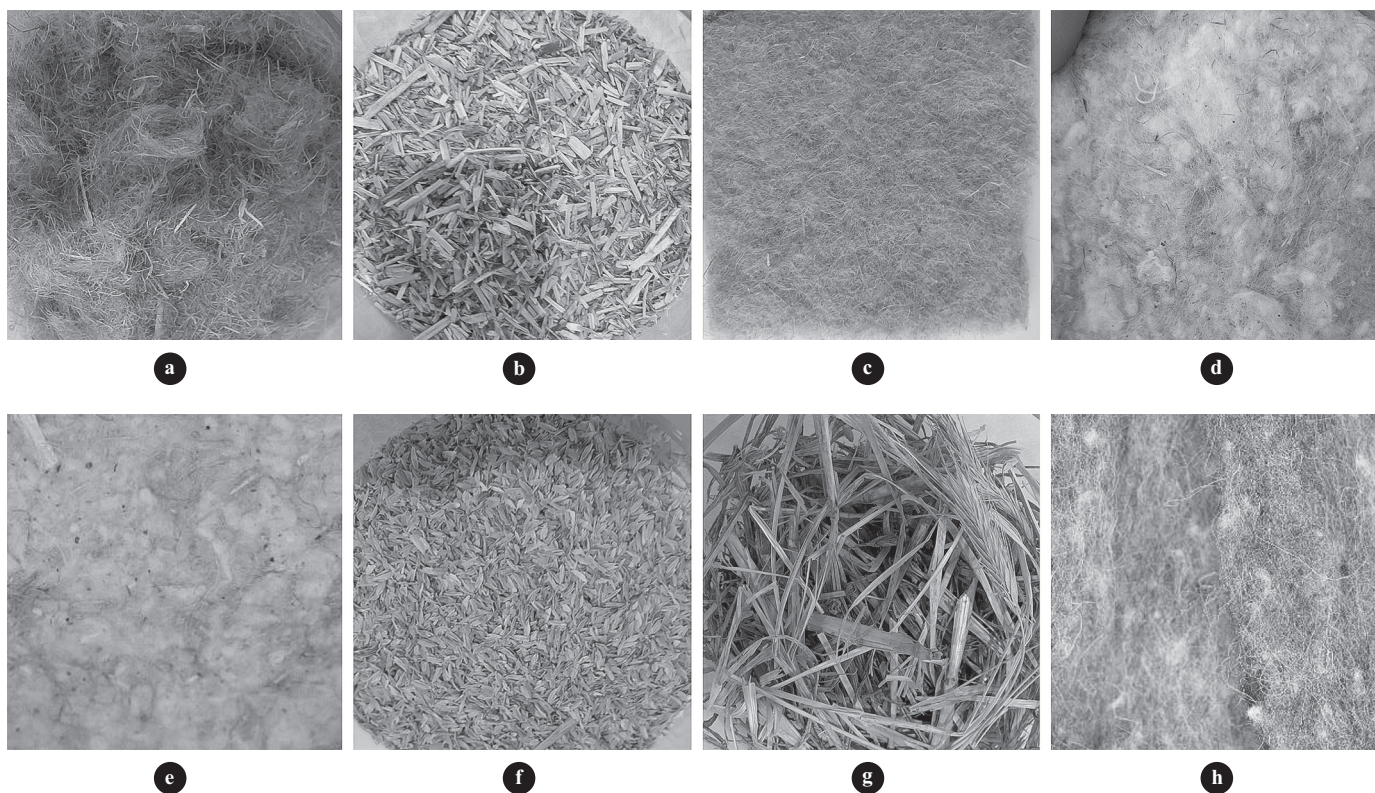
de déchets [37] [38]. En France, c'est notamment le cas du chanvre, du lin, du miscanthus, des balles de céréales et de riz, de la paille de céréales, de riz et de lavande, ainsi que de la laine de mouton (photo 1).

La recherche scientifique s'intéresse aussi à la valorisation d'autres sous-produits de l'agriculture dans des applications isolantes, notamment la paille de colza [39] [40], la betterave sucrière [41] [42] [43] et le maïs [44] [45].

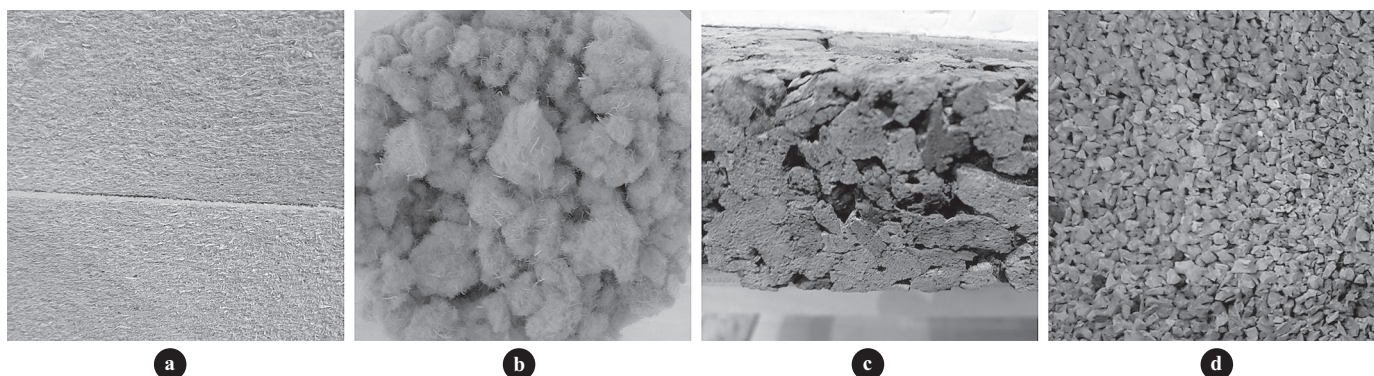
Au-delà du territoire français et européen, d'autres fibres végétales issues de l'agriculture peuvent être mises en avant pour la fabrication d'isolants thermiques. Il s'agit notamment des fibres de kapok, de coco, de kénaf, de jute et de sisal. La plupart de ces fibres sont utilisées dans la construction ainsi que dans le secteur du textile ou du cordage [34].

3.1.2 | Ressources végétales issues de la sylviculture

La forêt, source principale des matériaux de construction biosourcés, couvre environ 30 % de la planète de manière irrégulière, soit environ 0,62 hectare par habitant. Elle couvre également 38 % du territoire européen, avec une superficie totale de 159 millions d'hectares estimée en 2019. Bien qu'inégalement répartie entre les pays européens, la surface forestière moyenne de l'UE progresse au fil des ans ; elle s'est



▲ Photo 1. Laine de chanvre en vrac (a), chènevotte en vrac (b), laine de lin (c), fibres mélangées, chanvre, lin et cellulose (d), fibres mélangées, chanvre, coton (e), balles de riz (f), paille de blé (g) et laine de mouton (h) (source : D. Stiernon et S. Trachte).



▲ Photo 2. Fibres de bois sous forme de panneau (a) et de flocons en vrac (b) ; liège sous forme de panneau (c) et de granules en vrac (d) (source : D. Stiernon et S. Trachte).

ainsi accrue d'environ 11 millions d'hectares entre 1990 et 2010, sous l'effet notamment de son expansion naturelle et des efforts de boisement [46]. Les forêts européennes sont majoritairement dominées par des espèces de feuillus, bien qu'une proportion importante de résineux soit observée en Suède, en Finlande, en Autriche, en Allemagne et en Pologne [47].

Les forêts françaises, quant à elles, couvrent 32 % du territoire métropolitain, dont les trois-quarts appartiennent à des propriétaires privés. Elles sont constituées de 190 espèces différentes, principalement des feuillus (chêne, hêtre, châtaignier, charme, frêne, érable et peuplier), mais aussi quelques résineux tels que l'épicéa et le sapin [48].

Les matériaux isolants produits à partir des ressources forestières sont les isolants en fibres de bois et ceux en liège (photo 2).

Les matériaux isolants à base de fibres ou de laine de bois tirent parti des déchets de bois résultant de la gestion forestière et du fonctionnement des scieries. Les résineux comme les feuillus sont utilisés soit séparément, soit en mélange, selon le produit.

Par exemple :

- l'isolant Flex 40 d'Isonat est produit uniquement à partir de plaquettes de bois résineux français certifié PEFC⁽²⁾ (principalement du pin Douglas), qui sont des co-produits de scieries ;
- l'isolant Pavaflex de Soprema est produit à partir d'un mix de déchets de bois résineux et de feuillus ;
- l'isolant Pavawall de Soprema est fabriqué à partir de plaquettes de scieries, de plaquettes forestières et de plaquettes de rondins, constituées à 100 % d'essences résineuses issues de la région des Vosges ;
- l'isolant Thermosafe-Homogen de Gutex est produit à partir de plaquettes de bois de diverses essences, issues de scieries allemandes.

(2) Programme for the Endorsement of Forest Certification (programme de reconnaissance des certifications forestières).

Les matériaux isolants à base de « liège » proviennent, d'une part, de l'écorce du chêne-liège, cultivé principalement dans le bassin méditerranéen (Portugal, Espagne et Algérie), et, d'autre part, du recyclage des produits en liège, notamment des bouchons issus de l'industrie vinicole. Les produits en vrac ou en panneaux sont soit naturels (couleur claire), soit expansés (couleur foncée).

Par ailleurs, des recherches sur l'utilisation des fibres de bambou comme isolant thermique se développent depuis plusieurs années [49] [50]. La société française Fiboo [51], implantée dans les Hauts-de-France, développe un isolant semi-rigide à base de fibres de bambou, cultivé localement par l'entreprise.

3.1.3 | Ressources minérales et végétales issues de l'écosystème marin

Les matières minérales et végétales issues de l'écosystème marin sont encore peu exploitées pour la production de matériaux isolants, bien qu'ils présentent un potentiel certain tant pour le secteur de l'isolation et de la construction que pour d'autres secteurs économiques. En effet, les coquillages comme les algues sont présents dans toutes les mers du globe et s'échouent naturellement sur les plages, où ils sont considérés comme des déchets (photo 3). Les algues ne nécessitent ni pesticide ni engrais pour se développer, mais subissent déjà les effets du changement climatique.

Sont actuellement disponibles sur le marché :

- les coquillages en vrac, extraits de la mer des Wadden par la société Isoschelp [52] aux Pays-Bas et qui sont utilisés comme isolants dans les vides sanitaires ou les vides ventilés sous les bâtiments ;
- certains produits à base d'algues, comme le NeptuTherm [53] ou le Seegrass, qui présentent de bonnes performances thermiques et hygrothermiques ainsi qu'un bon comportement au feu. En France, des projets pilotes, comme celui de l'association Normandie Filière Algues (NFA) [54], encouragent la structuration de filières de collecte et de valorisation des algues échouées.

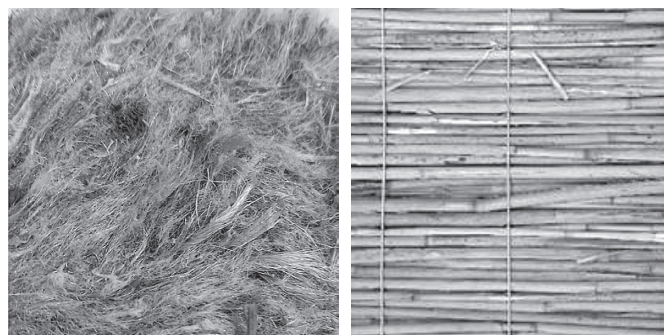


▲ Photo 3. Coquillages (source : D. Stiernon et S. Trachte).

3.1.4 | Matières et fibres végétales issues d'autres écosystèmes naturels

D'autres fibres végétales telles que le roseau, l'herbe, le mycélium et l'ortie se développent naturellement et facilement sans intervention humaine au sein de divers écosystèmes. Ces fibres jouent un rôle important dans la régénération des sols ainsi que dans la préservation des habitats et de la biodiversité, tout en présentant un fort potentiel de développement dans le domaine de l'isolation biosourcée.

Si les filières sont déjà bien établies pour les fibres d'herbe, grâce à l'entreprise Gramitherm [55], et pour les roseaux, avec les entreprises Hiss Reet [56] et RizHome [57] (photo 4), elles doivent encore se renforcer pour le mycélium et se développer entièrement pour l'ortie – une fibre végétale utilisée actuellement pour d'autres usages (textiles, cosmétiques) et présentant des performances thermiques et structurelles similaires à celles du lin [58] [59]. En ce qui concerne le mycélium, l'entreprise belge PermaFungi [60] a récemment inauguré, près de Bruxelles, sa première usine de production de panneaux isolants et d'emballages.

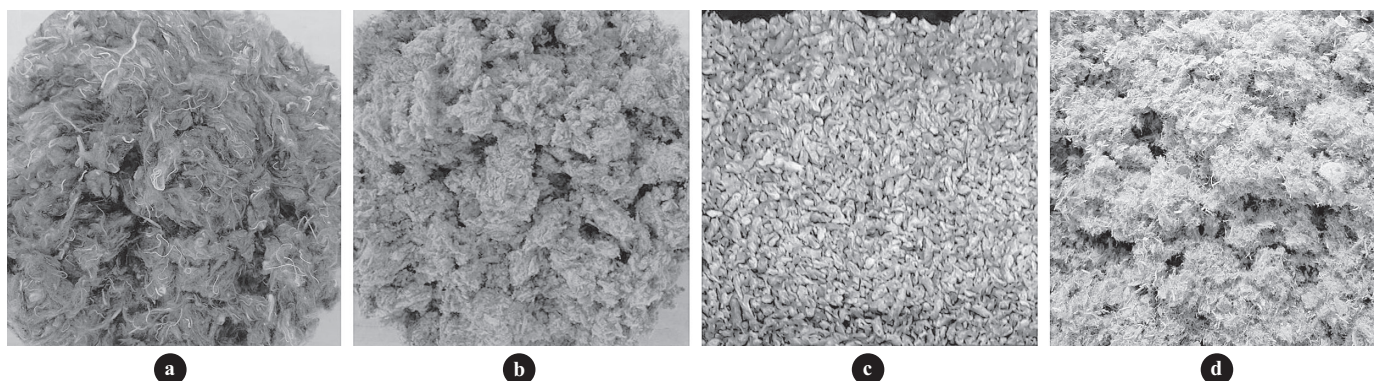


▲ Photo 4. Matelas d'herbes (a), panneau de roseaux (b) (source : D. Stiernon et S. Trachte).

3.1.5 | Matières et fibres végétales issues des filières de recyclage

Outre les fibres végétales issues des milieux naturels de l'écosystème terrestre, de plus en plus d'isolants biosourcés sont produits à partir de matières secondaires provenant des filières de recyclage d'autres secteurs industriels, telles que les textiles, le papier ou les panneaux dérivés du bois (photo 5). Ces matières sont à privilégier, et leur utilisation doit être renforcée, car elles favorisent une gestion durable et circulaire des ressources tout en réduisant la pression sur les milieux naturels, la production de déchets et les impacts environnementaux liés à leur traitement.

Ces matières secondaires sont d'ailleurs au cœur des politiques européennes, notamment du plan d'action pour l'économie circulaire adopté en 2022 [61] et du pacte vert pour l'Europe [62], qui vise une transition circulaire, écoresponsable et neutre en carbone du système économique européen, tout en soutenant l'innovation industrielle.



▲ Photo 5. Fibres de coton recyclé (a), flocons de cellulose recyclée (b), granules de papier recyclé (c), fibres de bois issues de MDF⁽³⁾ recyclé (d) (source : S. Trachte (a à c), Lenoo (d)).

(3) Medium Density Fiberboard (panneau de fibres de bois de densité moyenne).

EN SAVOIR PLUS

Une description plus précise de chaque isolant biosourcé (ressource utilisée, processus de fabrication et conditionnement) est reprise dans l'ouvrage *Isolants thermiques en rénovation – Réaliser un choix équilibré entre confort, performance énergétique, approche environnementale et gestion circulaire des ressources* [13] des deux autrices.

3.2 Ressources à exploiter pour répondre au besoin croissant des matériaux pour la rénovation du parc

Les matériaux biosourcés, et spécifiquement les isolants biosourcés, se présentent comme une réponse simple et efficace, voire évidente, à nos besoins croissants pour construire et plus particulièrement pour rénover le parc bâti existant. Ce faisant, ils permettent aussi d'assurer un développement économique durable et résilient en maximisant l'usage efficient des ressources et en approvisionnant plusieurs secteurs industriels et alimentaires tout en garantissant la régénération des territoires, en limitant le changement climatique et en réduisant la pression sur l'environnement et les ressources à disposition.

Aux côtés de la terre crue et de la pierre, les matériaux biosourcés ont longtemps constitué les seuls matériaux utilisés par l'homme pour construire son habitat. Cela explique leur omniprésence aujourd'hui dans le bâti vernaculaire de toutes les régions du monde. Si ces matériaux ont été relégués au second plan lors de la reconstruction de l'après-guerre en Europe pour laisser place à des matériaux composites davantage transformés, ils reviennent aujourd'hui en force sur le marché de la construction et de la rénovation. Grâce principalement à leur caractère renouvelable, à leur capacité de stockage du carbone et à leur ancrage territorial, mais aussi à une certaine maturité technique justifiée par les agréments dont ils font l'objet, ces matériaux ont insufflé une dynamique innovante dans le secteur, tout en permettant de renouer avec l'intelligence constructive et les savoir-faire artisanaux. Leur usage encourage des pratiques engagées, en circuits courts, tant en production qu'en mise en œuvre, s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire [63].

Outre, ces premiers atouts, les isolants biosourcés offrent une diversité de solutions techniques grâce à une large gamme de matières premières et de conditionnements. Ainsi, toute opération de rénovation peut bénéficier d'une solution d'isolation biosourcée à la fois techniquement adaptée aux spécificités du bâti étudié et de ses composantes, tout en restant cohérente avec le climat et le milieu dans lequel ce bâti s'implante.

Compte tenu des objectifs de massification des opérations de rénovation énergétique initiés et encouragés par le pacte vert pour l'Europe, les besoins en isolants thermiques et en matériaux de parachèvement vont augmenter sensiblement.

L'Ademe l'a démontré en 2019 [12] à travers une étude estimant la consommation de matériaux isolants par le biais

de trois scénarios d'évolutions quantitatives des travaux de rénovation.

Dans cette perspective, une étude menée en Belgique en 2023 par Valbiom [64] visant à estimer les volumes de production déjà disponibles et leur marge de progression affirme que les producteurs d'isolants biosourcés (cellulose recyclée, fibres d'herbe, chaux-chanvre et laine de mouton) n'avaient pas encore atteint leur pleine capacité de production. Les entreprises wallonnes contactées par Valbiom ont dit avoir fourni 615 000 m³ d'isolants biosourcés en 2023. Elles estiment pouvoir doubler leur volume de production, et ce, à très court terme.

Selon l'Ordre des architectes français et l'« Atlas des acteurs biosourcés » [65], la filière biosourcée représente environ 250 professionnels, dont 70 acteurs en Île-de-France. Treize filières de matériaux biosourcés sont représentées (hors terre crue), issues à la fois de la biomasse (bois, chanvre, laine, liège, lin, miscanthus, paille, riz, roseau, chaume, miscanthus) et du recyclage (ouate de cellulose, coton).

Un déploiement massif des isolants biosourcés dans le secteur européen de la construction nécessite à la fois :

- une diversification des cultures et une expansion des surfaces agricoles dédiées à la production de ces fibres végétales ;
- une meilleure valorisation des co-produits agricoles tels que le chanvre, le lin, mais aussi la paille ou la laine de mouton ;
- un renforcement de la chaîne logistique entre acteurs (production, transformation, application) ;
- une réelle structuration des filières de collecte et de valorisation de certains déchets, notamment les déchets de bois.

Outre ces premiers aspects, un frein majeur à l'adoption massive des isolants biosourcés dans les secteurs de la construction et de la rénovation réside dans le manque de compétences et d'expertise professionnelles [66], ainsi que dans les nombreux *a priori* relatifs à leurs performances et leur durabilité [67]. Il est donc nécessaire que les acteurs de la rénovation se forment davantage à ces matériaux et à leurs techniques de mise en œuvre, et que les pouvoirs publics informent et sensibilisent le grand public sur leurs nombreux atouts.

3.3 Transformations subies lors du processus de fabrication

Les matières premières utilisées pour la fabrication des matériaux isolants subissent différents types de transformation pour obtenir le produit fini destiné à être mis en œuvre dans un bâtiment. Ces transformations peuvent être physiques, mécaniques, chimiques, voire une combinaison des trois. Plus la matière première subit de transformations, plus le produit final s'éloigne de son état d'origine et devient difficile à ramener à cet état, donc à recycler [13].

La fabrication des isolants biosourcés, contrairement aux isolants plus conventionnels, nécessite peu de transformations.

Ces transformations sont principalement mécaniques ou physiques. Les matières sont le plus souvent découpées, broyées, défibrées, cardées, humidifiées, étuvées, séchées et/ou mélangées à d'autres matières pour former des matériaux composites (chaux-chanvre, terre-chanvre, torchis, etc.).

Si les isolants biosourcés sous forme de vrac ne subissent généralement qu'une transformation mécanique, peu énergivore, il convient néanmoins de noter que le processus de production d'autres isolants biosourcés, comme les panneaux rigides de fibres de bois ou les panneaux de liège, nécessite également des transformations physiques plus intensives. Celles-ci comprennent notamment une montée en température de l'ordre de 200 °C pour le bois et 370 °C pour le liège, ainsi que l'utilisation de

vapeur d'eau et/ou de procédés de séchage pouvant engendrer une consommation d'énergie plus importante [13].

3.4 Formes et conditionnements

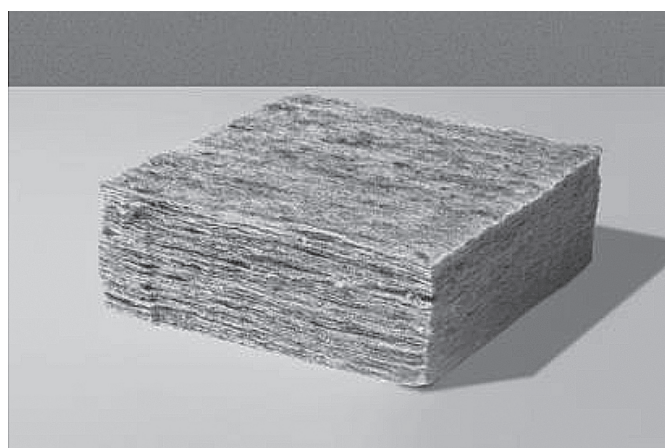
Les isolants biosourcés se présentent sous différentes formes ou divers conditionnements, allant du vrac au panneau rigide (photo 6), en passant par le matelas souple, le feutre ou la laine de bourrage (photo 7). Le plus souvent, ils se présentent sous forme de vrac, de feutres ou de matelas souples ou semi-rigides. Seuls le liège, la fibre de bois et le chaux-chanvre proposent un conditionnement en panneaux (ou blocs) rigides et incompressibles.



▲ Photo 6. Isolants biosourcés sous forme de matelas semi-rigides et panneaux rigides : (1, 2) fibres de bois, (3) fibres de chanvre, (4) fibres de cellulose, (5) fibres d'herbe et (6) liège expansé (source : S. Trachte).



a



b

▲ Photo 7. Isolants biosourcés sous forme de matelas : (a) fibres d'herbe et (b) laine de mouton Belgolan (sources : Gramitherm et Woolconcept).

La forme d'un isolant thermique, si elle influence ses propriétés thermiques et hygrothermiques, influence surtout sa capacité de résistance à la compression, qui elle-même conditionne son usage et sa mise en œuvre en rénovation (fig. 3). Lorsqu'ils se présentent sous une forme semi-rigide ou rigide, les isolants biosourcés, excepté le liège et le chaux-chanvre, peuvent contenir, selon leur nature, un pourcentage significatif (entre 8 et 20 %) de fibres ou de liants synthétiques qui peut influencer négativement leur bilan environnemental et leur potentiel de recyclage.

3.5 L'influence de la nature et de la forme sur le bilan environnemental

L'analyse des déclarations environnementales et les analyses de cycle de vie réalisées sur les matériaux biosourcés mettent en évidence que la nature et la forme de l'isolant peuvent influencer le bilan environnemental de celui-ci.

Les isolants biosourcés, en exploitant des ressources renouvelables principalement issues de la biomasse, réduisent significativement la pression sur les ressources naturelles. En outre, le recours à des co-produits et sous-produits renforce l'utilisation efficiente des ressources végétales produites par différents secteurs, dont celui de l'agriculture et de la foresterie, tout en limitant la production de déchets. Il en est de même pour les déchets des secteurs papetier ou textile, qui sont valorisés dans la production d'isolants biosourcés. Cette valorisation de ressources dites « secondaires » influence favorablement les résultats de l'analyse de cycle de vie, principalement sur les étapes d'apport de matières premières (module A1) et de traitement des déchets (module C4). En outre, l'utilisation de la biomasse locale permet aussi de réduire le bilan carbone sur les premières étapes du cycle de vie.

Les isolants biosourcés en vrac ou en matelas souple sont généralement peu transformés. Ce faible niveau de transformation permet de réduire l'impact environnemental du

Rigidité et capacité de résistance à la compression			
En vrac	Souple	Semi-rigide	Rigide
Cellulose et coton recyclé, chènevotte, granules de bois et papier recyclé, balles de céréales et de riz, fibres de bois et de chanvre, laine de mouton	Cellulose et coton recyclé, fibres de bois, chanvre et lin, laine de mouton	Fibres de bois, chanvre, herbe et lin, fibres mélangées (cellulose/chanvre/lin/coton), paille de céréales, paille de riz	Fibres de bois, liège, chaux-chanvre, mycélium
Billes, granulats, paillettes, flocons ou fibres en vrac	Feutres, rouleaux ou matelas souples	Panneaux	Panneaux
Aucune résistance à la compression	Aucune résistance à la compression	Résistance à la compression faible à moyenne	Résistance à la compression élevée
Matériau flexible et compressible, permet un remplissage total de l'espace et un bon calfeutrement des raccords et joints	Matériau flexible et compressible, permet un remplissage total de l'espace et un bon calfeutrement des raccords et joints	Matériau moyennement flexible et adapté aux surfaces irrégulières et formes compliquées	Matériau non flexible et inadapté aux surfaces irrégulières et formes compliquées
Mise en œuvre par déversement, insufflation sous pression, projection ou flocage	Mise en œuvre en pose libre, par friction ou agrafage	Mise en œuvre par pose libre, par friction, par agrafage et/ou par fixation mécanique	Mise en œuvre par pose libre (si lesté), par collage et/ou fixation mécanique
Nécessite l'emploi de structure et/ou de caissons	Nécessite l'emploi de structure et/ou de caissons	Nécessite l'emploi de structure et/ou de caissons	Ne nécessite pas l'emploi de structure et/ou de caissons
Mise en œuvre totalement réversible, sans dommage pour le matériau	Mise en œuvre totalement réversible, sans dommage pour le matériau	Mise en œuvre avec dommage réparable réversible, sans dommage pour le matériau	Mise en œuvre la plupart du temps non réversible (sauf si fixation mécanique), avec dommage pour le matériau
Potentiel élevé de réemploi ou de réintroduction dans un cycle de production	- Potentiel élevé de réemploi - Potentiel de recyclage dépendant du % de matières secondaires	- Potentiel élevé de réemploi - Potentiel de recyclage dépendant du % de matières secondaires	- Potentiel de réemploi limité - Potentiel de recyclage dépendant du % de matières secondaires

▲ Fig. 3. Influence de la forme et résistance à la compression sur l'utilisation, la mise en œuvre et le potentiel de réemploi des isolants biosourcés (source : S. Trachte).

processus de production tout en offrant des opportunités de valorisation après un premier cycle d'utilisation. La plupart de ces isolants se mettent en œuvre facilement, sans éléments connecteurs complémentaires. Ils ont des durées de vie similaires aux isolants conventionnels et ne nécessitent pas d'entretien une fois mis en œuvre. La réversibilité de leur assemblage encourage leur valorisation future par réemploi et/ou recyclage tout en réduisant l'impact environnemental de leur fin de vie.

4 Propriétés techniques et positionnement des isolants biosourcés

Les isolants thermiques font aujourd'hui partie intégrante de la conception architecturale des bâtiments, compte tenu des épaisseurs à mettre en œuvre pour atteindre les exigences réglementaires.

En construction neuve, l'isolation par l'extérieur (ITE) est favorisée dans la plupart des cas, car elle facilite l'implémentation d'une couche isolante continue et permet ainsi d'éviter les ponts thermiques. Les techniques de mise en œuvre de l'isolation dépendent essentiellement de l'enveloppe financière, du type de support sur lequel doit être posé l'isolant et du choix du parement extérieur. L'isolant est sélectionné principalement en fonction de sa conductivité thermique (valeur λ), de façon à réduire les épaisseurs à appliquer.

En revanche, la réhabilitation énergétique des bâtiments anciens nécessite de questionner la valeur architecturale, historique ou culturelle du bâtiment et de son enveloppe extérieure, ainsi que le lien de cohérence établi entre le bâtiment et son environnement immédiat, qu'il soit rural ou urbain. Ce faisant, la plupart du temps, le choix se porte sur une isolation par l'intérieur (ITI) qui permet de conserver la qualité esthétique et architectonique des façades et de mettre en évidence les matériaux et éléments qui les composent. Les techniques de mise en œuvre dépendent alors de l'état et de la composition des parois ainsi que de la surface intérieure disponible. La sélection de l'isolant thermique, outre la conductivité thermique, doit s'effectuer en intégrant différents aspects, notamment la capacité de l'isolant à stocker et conserver la chaleur, mais aussi et surtout à réguler l'humidité et la vapeur.

Ainsi, les matériaux présents dans le bâti ancien et les matériaux isolants utilisés pour la rénovation doivent être caractérisés en fonction de leurs propriétés physiques et hygrothermiques.

La grande majorité des isolants biosourcés sont des matériaux fibreux ou granulaires. Les « amas » de fibres ou granules dont ils sont constitués leur permettent de contenir de l'air immobile et leur confèrent leur propriété isolante. Ces matériaux fibreux se distinguent des isolants organiques issus de la pétrochimie

(EPS, XPS, PUR⁽³⁾) par une porosité ouverte, une caractéristique essentielle dans le cadre d'une isolation par l'intérieur. En plus d'absorber les ondes sonores, la porosité ouverte de ces matériaux facilite la circulation et le changement de phase de l'eau qu'ils contiennent. Ces transferts sont à l'origine d'un fonctionnement dit « hygrothermique dynamique » et jouent un rôle de régulateur thermique et hygrométrique particulièrement performant. Ces différentes propriétés sont présentées ci-après pour une vingtaine d'isolants biosourcés et comparées à celles de quelques isolants conventionnels.

4.1 Les propriétés physiques

Les principales propriétés physiques des isolants thermiques sont la masse volumique, la capacité thermique massique, la diffusivité thermique et la conductivité thermique.

4.1.1 Conductivité thermique

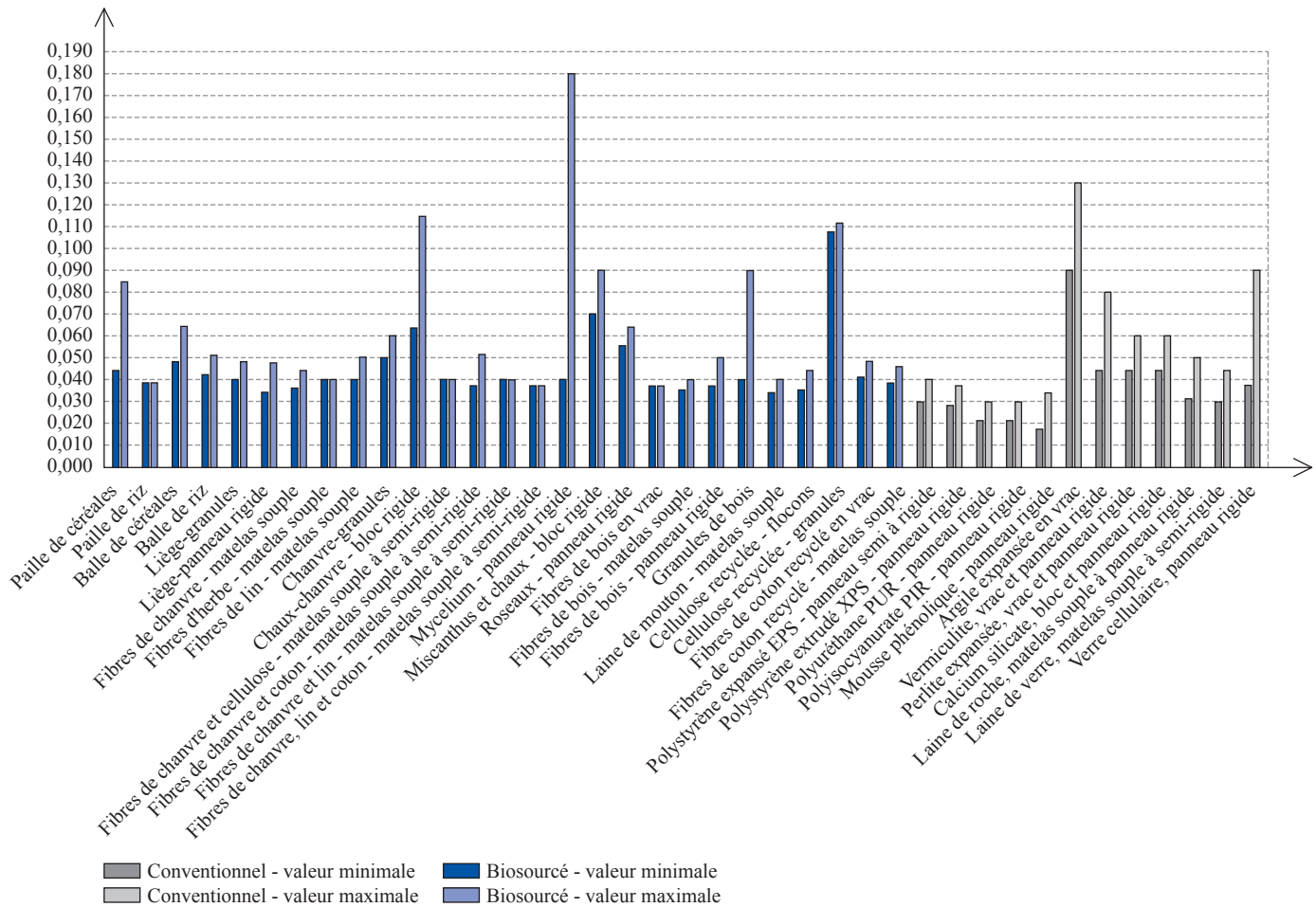
La conductivité thermique est une caractéristique spécifique à chaque matériau, qu'il soit isolant ou non. Exprimée en watt par mètre-kelvin (W/m.K), cette caractéristique traduit la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. Elle correspond au flux de chaleur qui traverse en une seconde un matériau d'une surface d'un mètre carré et d'une épaisseur d'un mètre pour un écart de température d'un degré. Ainsi, plus la conductivité thermique est faible, meilleure est la capacité d'isolation du matériau.

Dès lors, selon la norme EN ISO 10456 [68], un matériau est généralement considéré comme « isolant » lorsque sa conductivité thermique à l'état sec est inférieure ou égale à 0,065 W/m.K. Au-delà de cette valeur, le matériau est plutôt qualifié de « correcteur thermique ».

La conductivité est une caractéristique qui évolue en fonction de la température et de l'humidité, mais est également liée à la densité du matériau. Ainsi, pour une même nature d'isolant, la conductivité thermique peut varier selon la forme qu'il adopte (fig. 4).

La conductivité thermique d'un isolant permet de définir, pour une certaine épaisseur d'isolant, la résistance thermique de cette couche. En effet, la *résistance thermique* désigne la capacité d'une couche d'isolant thermique, ou de tout autre matériau, à résister à la transmission ou au passage de chaleur. Cette propriété dépend de l'épaisseur du matériau (en mètre) et de sa conductivité thermique λ . Elle est représentée par le coefficient R et est exprimée en mètre carré-kelvin par watt ($m^2.K/W$).

(3) EPS : Expanded Polystyrene (*polystyrène expansé*) ; XPS : Extruded Polystyrene (*polystyrène extrudé*) ; PUR : polyuréthane.



▲ Fig. 4. Échelle de valeurs détaillant la conductivité thermique λ (en W/m.K) de 39 isolants (source : S. Trachte).

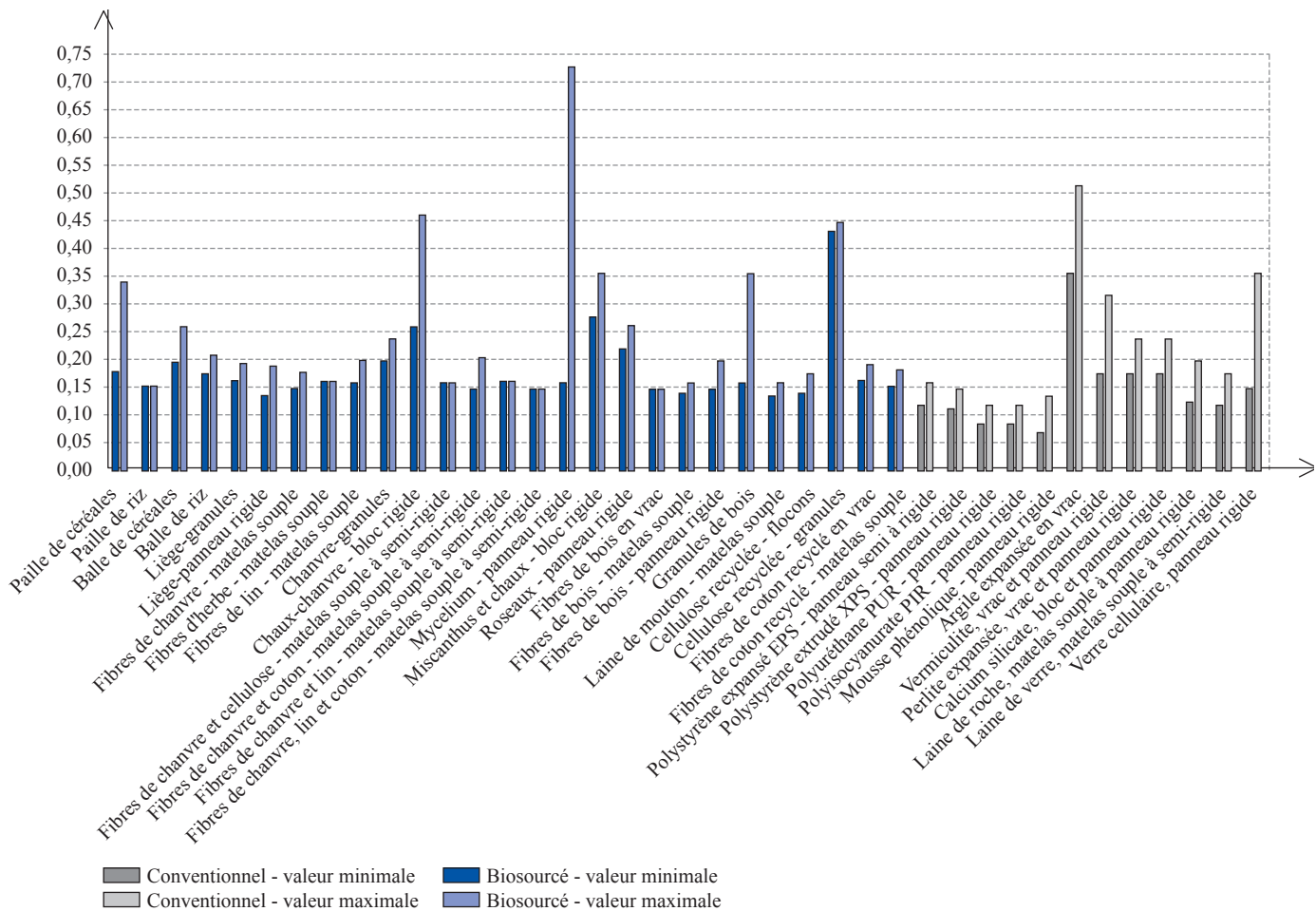
La figure 5 indique que la plupart des isolants biosourcés nécessitent une épaisseur variant de 15 à 20 cm pour répondre à l'exigence $R = 4 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Ces épaisseurs sont légèrement supérieures à celles des laines minérales et des isolants synthétiques, qui se situent respectivement entre 12 et 20 cm et entre 7 et 14 cm.

La conductivité thermique et l'épaisseur d'un isolant, ou sa résistance thermique, combinées à la résistance thermique des autres couches de matériaux en présence dans la paroi à isoler, permettent de déterminer le *coefficient de déperdition thermique U* de celle-ci, exprimé en watt par mètre carré-kelvin. Ce coefficient représente le flux de chaleur qui traverse une paroi en régime permanent, rapporté à une unité de temps, de surface et de différence de température entre les deux côtés de la paroi. Il permet ainsi d'évaluer la performance isolante de cette paroi et constitue l'un des indicateurs utilisés dans

les réglementations encadrant la performance énergétique des bâtiments.

Si la conductivité thermique d'un isolant est déterminante en période hivernale, ce même isolant doit aussi être capable d'agir, en période estivale et à mi-saison, face à des températures extérieures de plus en plus souvent supérieures à 25 °C, voire 30 °C, dans la plupart des régions d'Europe.

En effet, dans le cas d'une ITI, les ambiances intérieures ne profitent plus de l'*inertie thermique* des murs extérieurs, souvent constitués de maçonnerie épaisse de briques ou de moellons de pierre. Cette inertie thermique est définie comme la capacité d'un matériau ou d'une paroi à stocker et à restituer de la chaleur avec un déphasage de temps. Ce sont principalement les matériaux dits « lourds » ou ayant une masse volumique importante qui offrent davantage d'inertie thermique : béton, pierre naturelle, briques, etc. Cette caractéristique est particu-



▲ Fig. 5. Échelle de valeurs détaillant, pour 39 isolants, l'épaisseur (en m) à mettre en œuvre pour atteindre une résistance thermique $R = 4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (source : S. Trachte).

lièrement intéressante pour garantir le confort thermique, tant en hiver, en stockant les gains solaires, qu'en été, en évitant les surchauffes. Elle permet en effet de limiter les effets d'une variation « rapide » de la température extérieure sur le climat intérieur par un déphasage du flux de chaleur et par une atténuation ou un amortissement de l'amplitude de ce flux.

Il est donc essentiel de choisir un isolant capable, grâce à sa *capacité thermique massique* (voir § 4.1.3), de créer un grand déphasage de temps dans la restitution de la chaleur, et ainsi de limiter les surchauffes dans les bâtiments. Le déphasage est le temps que met la chaleur pour pénétrer à l'intérieur de l'habitat *via* les parois. Pour l'augmenter, le choix d'un isolant présentant une capacité de stockage thermique élevée s'avère déterminant. Les propriétés déterminant ce déphasage sont la masse volumique (ρ), la chaleur spécifique (c) et l'épaisseur (d).

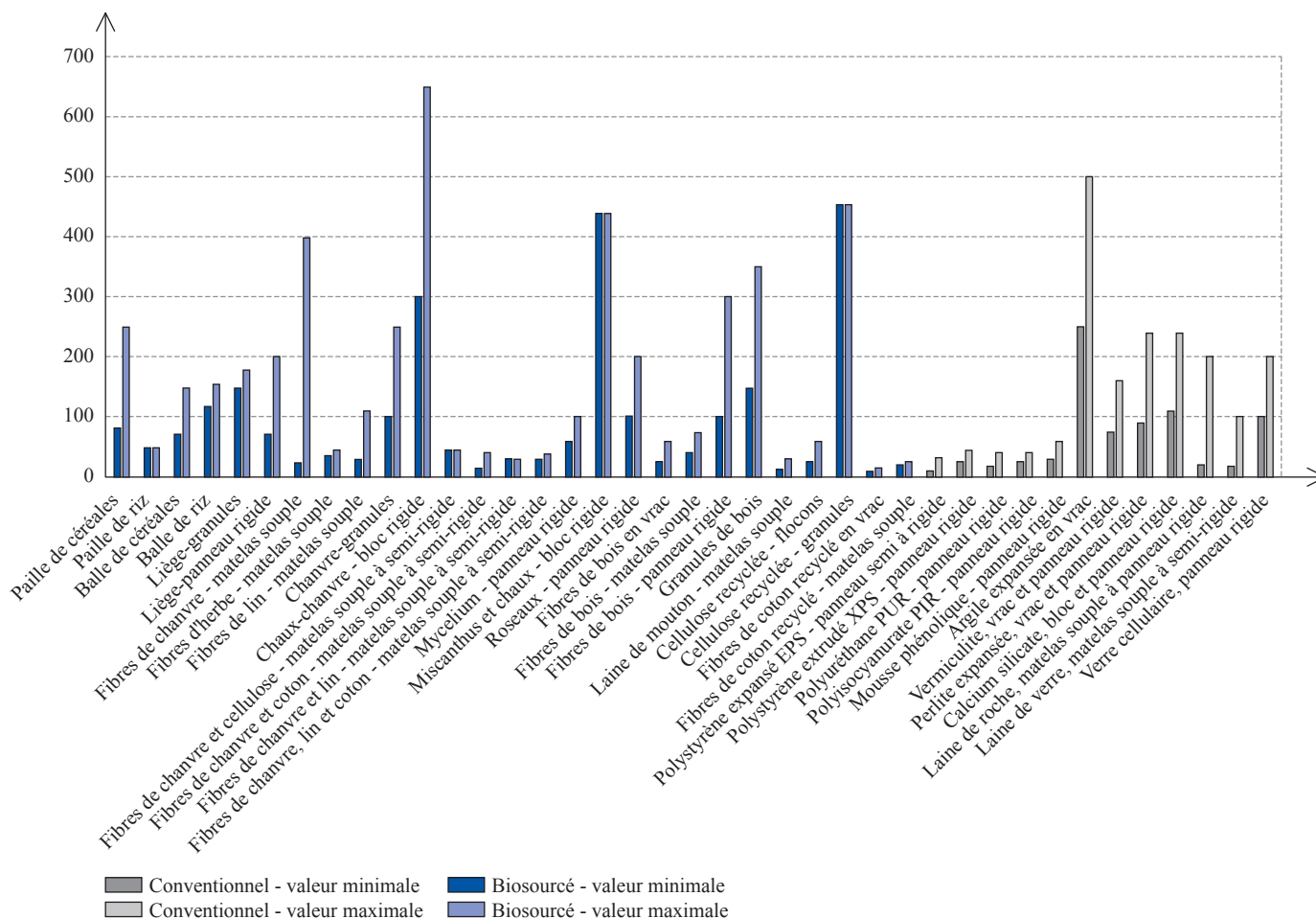
4.1.2 | Masse volumique

La masse volumique, ou « densité d'un matériau ρ », exprime la masse du matériau par unité de volume. Cet indicateur, exprimé en kilogramme par mètre cube (kg/m^3), permet de classer les matériaux d'isolation selon leur densité, des plus légers aux plus lourds.

Cette masse volumique peut également varier fortement selon la forme de l'isolant, et ce, pour une même nature de matériau (fig. 6).

4.1.3 | Capacité thermique massique

La chaleur spécifique, ou « capacité thermique massique c », exprimée en joule par kilogramme-kelvin, est une grandeur propre à chaque matériau qui indique la quantité



▲ Fig. 6. Échelle de valeurs détaillant la masse volumique ρ (en kg/m^3) de 39 isolants (source : S. Trachte).

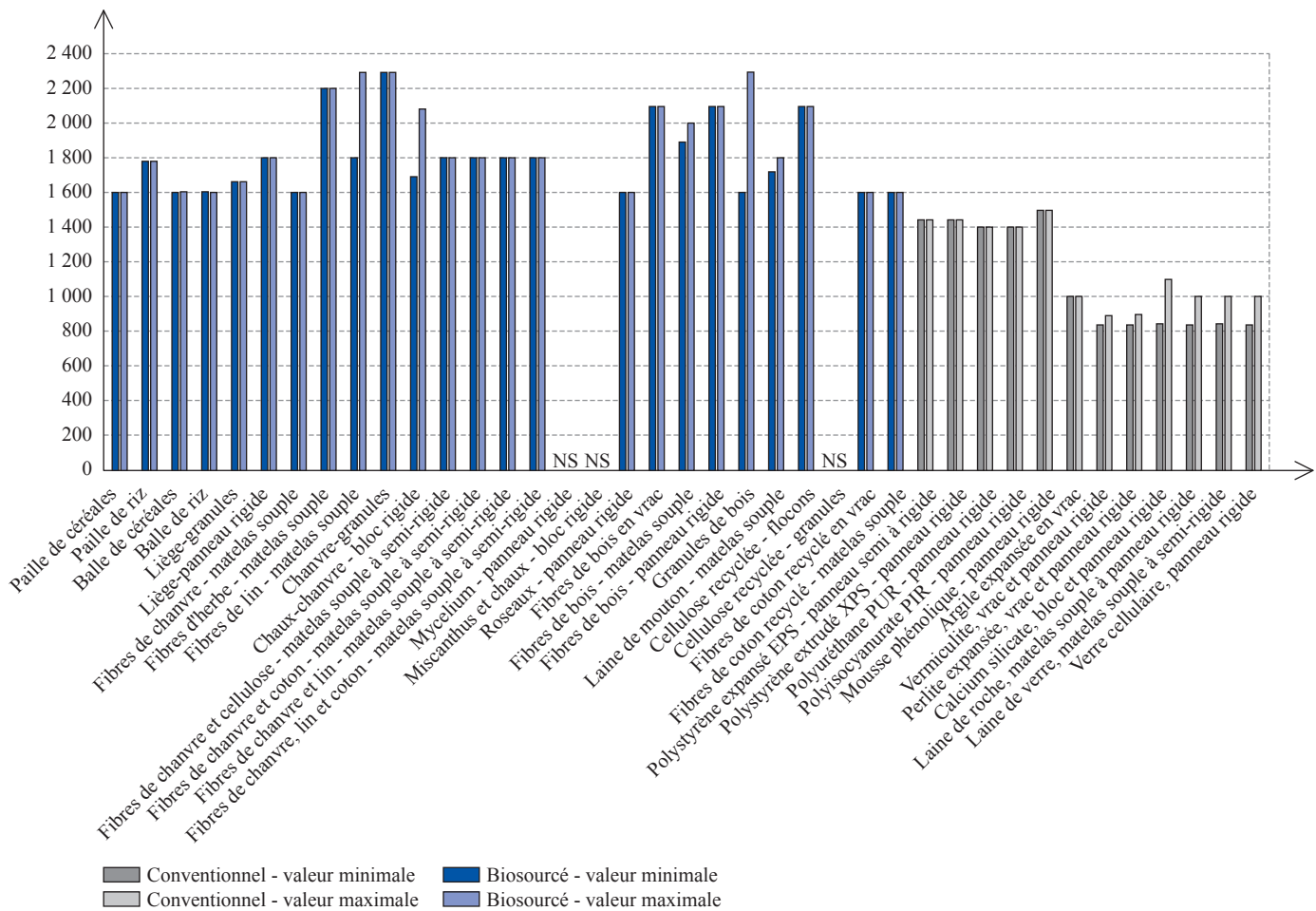
de chaleur à apporter à un kilo de matière pour élever sa température d'un kelvin. Elle permet d'évaluer si un matériau a la capacité d'emmagasiner de la chaleur : plus la valeur de c est grande, plus le matériau est capable de stocker de la chaleur. Bien que cette caractéristique, associée à la masse volumique, permette de mieux comprendre le comportement thermique des parois – principalement pour le confort estival –, elle est encore trop peu souvent renseignée dans les documents techniques transmis par les producteurs et fabricants.

Comme l'indique la figure 7, les isolants biosourcés présentent une capacité thermique massique généralement supérieure aux isolants conventionnels, se situant aux alentours de 1 600 à 1 800 J/kg.K . Certains isolants comme les fibres d'herbe, les granules de chanvre, la fibre de bois (sous différentes formes) et la cellulose recyclée présentent une capacité thermique massique de 2 200 J/kg.K , alors que la plupart des isolants

conventionnels, comme les laines minérales, se situent aux alentours de 1 000 J/kg.K et les isolants synthétiques autour de 1 400 J/kg.K .

4.1.4 | Capacité thermique volumique

Outre la conductivité thermique, c'est essentiellement la capacité thermique volumique des matériaux qui influence l'inertie thermique d'une paroi (fig. 8). La capacité thermique volumique d'un matériau est sa capacité d'emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. C'est la quantité totale de chaleur qu'un mètre cube de ce matériau est capable de stocker pour une augmentation de température d'un kelvin. Elle est définie par le produit de la densité du matériau ρ et de sa chaleur spécifique c , et elle est exprimée en joule par mètre cube-kelvin. Plus la capacité thermique volumique est grande, plus le matériau peut stocker de la chaleur.



▲ Fig. 7. Échelle de valeurs détaillant la capacité thermique massique (en J/kg.K) de 39 isolants (source : S. Trachte).

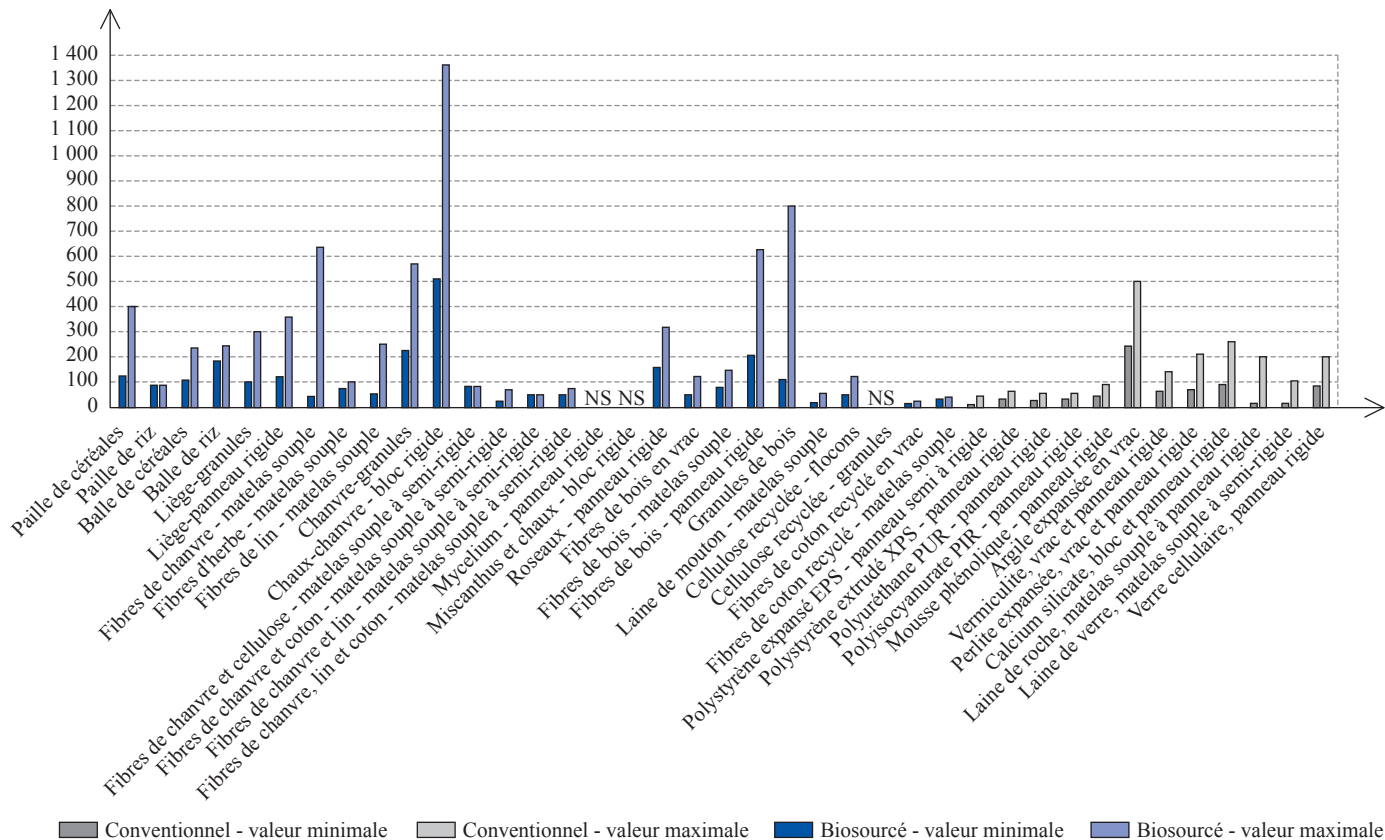
L'inertie thermique est en réalité une notion complexe pour laquelle doivent être distinguées l'inertie par transmission et l'inertie par absorption.

L'*inertie par transmission* caractérise la capacité d'une paroi à s'opposer à la transmission des variations de température de l'ambiance extérieure. Elle concerne plus spécifiquement les parois de l'enveloppe extérieure, qui séparent l'ambiance extérieure de l'ambiance intérieure.

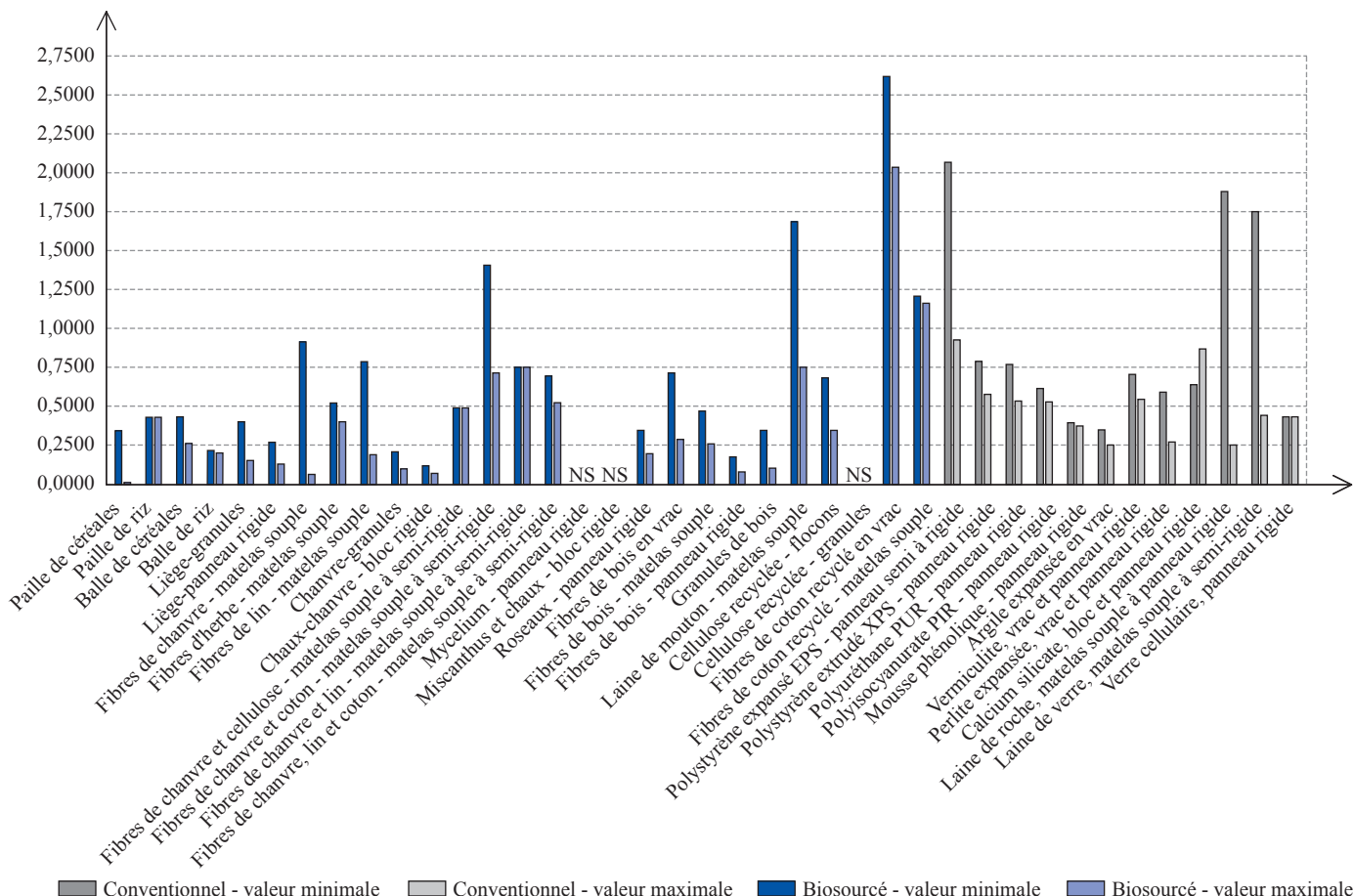
L'inertie par transmission est caractérisée par la *diffusivité thermique* (D). Cette grandeur détermine la vitesse avec laquelle un matériau monte en température lorsqu'il est soumis à une source de chaleur et/ou à des sollicitations thermiques extérieures (fig. 9). Elle se calcule par le rapport entre la conductivité thermique et la capacité thermique volumique et s'exprime en mètre carré par seconde. L'inertie par transmission d'une paroi est d'autant plus forte que sa diffusivité est faible.

L'*inertie par absorption* désigne la capacité d'une paroi à conserver une ambiance intérieure stable, en limitant l'amplitude des variations de température. Elle concerne principalement les parois intérieures (cloisons, planchers), ainsi que les matériaux des parois de l'enveloppe en contact avec les espaces intérieurs, comme les matériaux de finition, de parachèvement ou d'ITI. Elle est déterminée par l'*effusivité thermique* (E), qui exprime l'aptitude d'un matériau à absorber ou restituer rapidement une quantité significative d'énergie thermique (fig. 10). Plus l'effusivité d'un matériau est élevée, plus son inertie par absorption est importante.

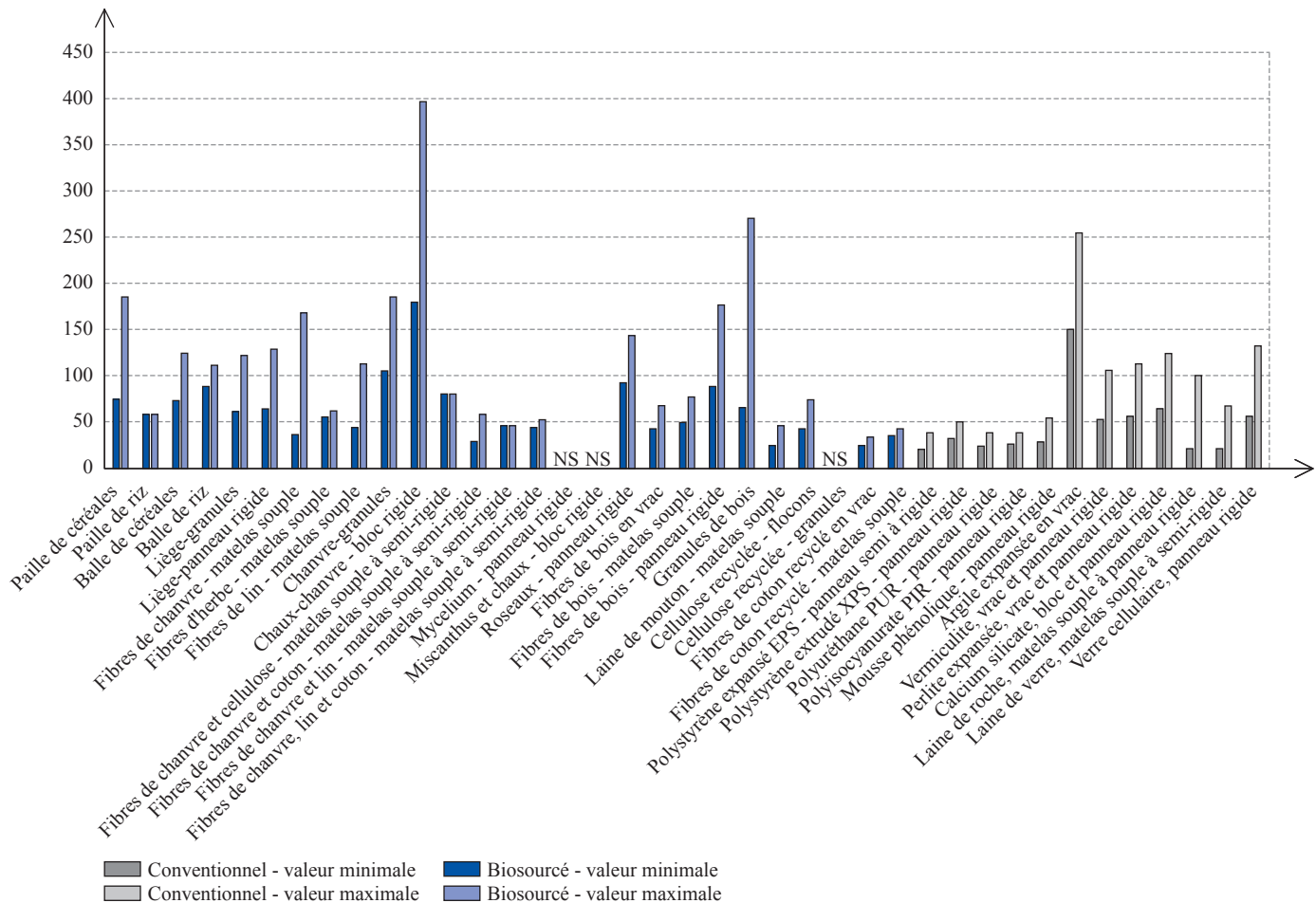
Ainsi, dans le bâti ancien, les parois de murs, principalement composées de matériaux lourds et denses (briques pleines, moellons de pierre), présentent à la fois une conductivité thermique et une capacité thermique volumique élevées, ce qui implique une effusivité élevée garantissant un confort estival. L'isolation par l'extérieur de ces murs permet de rajouter une



▲ Fig. 8. Échelle de valeurs détaillant la capacité thermique volumique (en kg.J/m³.K) de 39 isolants (source : S. Trachte).



▲ Fig. 9. Échelle de valeurs détaillant la diffusivité thermique D (en m²/s) de 39 isolants (source : S. Trachte).



▲ Fig. 10. Échelle de valeurs détaillant l'effusivité thermique E (en $J/m^2.K.s^{1/2}$) de 39 isolants (source : S. Trachte).

couche de matériau présentant une conductivité thermique et une diffusivité thermique faible, ce qui renforce encore le confort estival tout en améliorant sensiblement le confort hivernal. En revanche, dans le cas d'une isolation par l'intérieur, il convient de privilégier des isolants présentant un bon équilibre entre une masse volumique et une capacité thermique volumique plutôt élevées, associées à une conductivité thermique relativement faible. Cet équilibre peut être atteint avec les matériaux isolants biosourcés, qui présentent généralement une masse volumique et une effusivité thermique plus élevées que les isolants conventionnels.

À titre de synthèse, sont présentées dans la figure 11 la masse volumique et la conductivité thermique des 25 isolants biosourcés et des 8 isolants conventionnels analysés à partir des fiches de déclaration environnementale et sanitaire françaises (FDES) issues de la base de données française Inies [69]. Les autres propriétés physiques de ces 33 isolants ne sont pas présentées ci-après, en raison du manque de données disponibles dans les fiches techniques de ces produits, notamment concernant la capacité thermique massique.

Les valeurs de conductivité thermique des 25 isolants biosourcés se situent entre 0,036 et 0,071 W/(m.K) (fig. 12). Celle

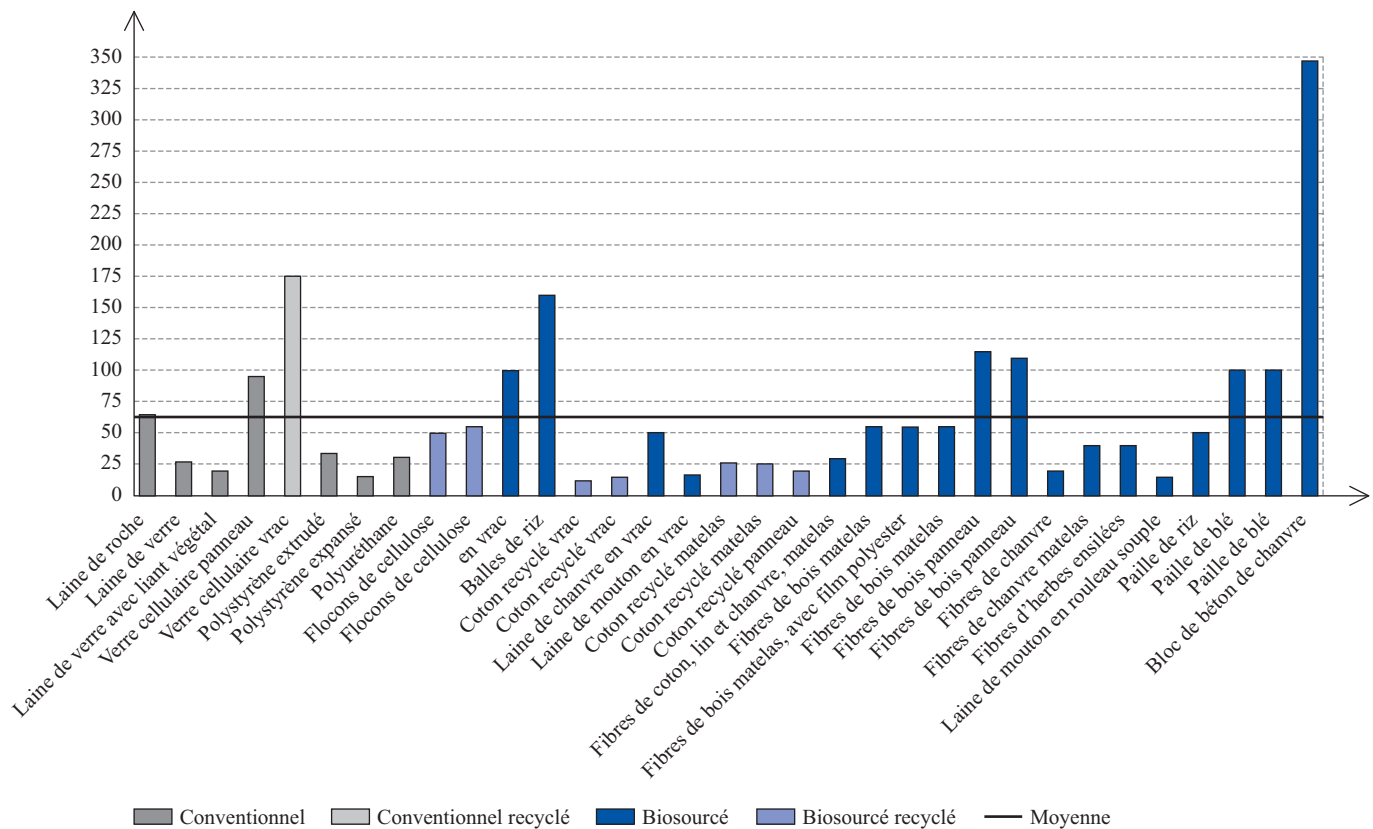
des isolants conventionnels varie de 0,022 à 0,080 W/(m.K). Les performances isolantes des matériaux biosourcés sont ainsi globalement un peu moins élevées que celles des isolants conventionnels, bien qu'un grand nombre d'entre eux présentent des valeurs inférieures à 0,04 W/(m.K).

De manière générale, les matériaux biosourcés présentent une masse volumique élevée, souvent supérieure à celle des isolants plus conventionnels (fig. 13). C'est particulièrement le cas pour la paille et les balles de céréales, le liège, les fibres et laines de bois, ainsi que le chanvre sous ses différentes formes, dont la masse volumique dépasse 50 kg/m³.

4.2 Les propriétés hygrothermiques

Les principales propriétés hygrothermiques [70] [71] qui permettent de caractériser le comportement d'un isolant face aux flux d'eau liquide et de vapeur d'eau sont la résistance à la diffusion de vapeur d'eau, la teneur en eau massique et le coefficient d'absorption d'eau.

D'importants échanges d'eau et de vapeur d'eau ont lieu entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, en raison des différences de température et d'humidité entre ces deux milieux. La



▲ Fig. 13. Masse volumique (en kg.m³) de 33 isolants présents sur le marché (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base Inies [69]).

gestion de ces flux est complexe et nécessite une attention particulière, principalement lors de la réhabilitation énergétique des bâtiments anciens, généralement constitués de matériaux poreux, ouverts à la diffusion de vapeur d'eau et perméables à la migration d'eau liquide [72]. Une mauvaise gestion de ces flux et de l'humidité des parois peut, en effet, entraîner des désordres rapides et, à plus long terme, mettre en péril la structure du bâtiment [73] [74].

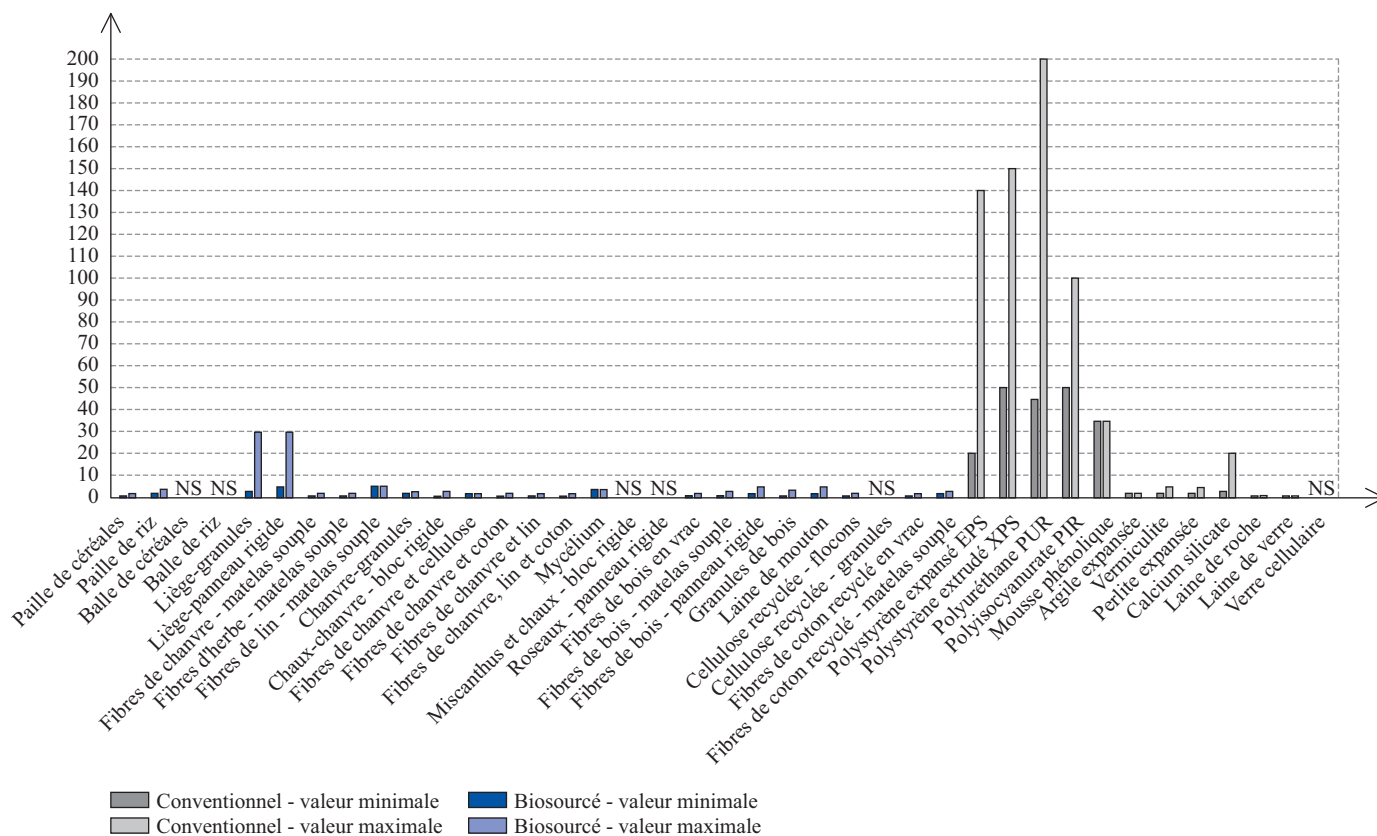
Les travaux de réhabilitation et la pose d'un isolant thermique doivent veiller à préserver la capacité des parois – en particulier des murs de façades – à réguler et à évacuer l'humidité qu'ils contiennent de manière naturelle, tout en réduisant les apports d'humidité. Cela implique notamment de limiter les remontées capillaires, de restreindre les risques d'infiltrations d'eau – tant en toiture qu'au niveau du pied des murs de façades –, de maintenir en bon état de conservation les enduits existants, d'éviter les risques de condensation dans la masse des parois comme en surface, et enfin d'assurer une ventilation efficace du bâtiment.

Ces propriétés permettent d'évaluer le caractère perspirant, capillaire et hygroscopique d'un matériau isolant et, par ce biais, son adéquation ou sa compatibilité avec les spécificités

de la paroi existante dans laquelle il va être intégré lors de l'opération de rénovation ou de réhabilitation énergétique. Cette évaluation doit également tenir compte de l'orientation de la paroi et des masques solaires environnants, de l'exposition au vent et à la pluie, ainsi que de l'utilisation et de l'usage des espaces intérieurs en lien direct avec la paroi [75].

Un *matériau perspirant* est un matériau capable de laisser diffuser la vapeur d'eau en son sein ou de se laisser traverser par celle-ci. La perspirance d'un matériau est évaluée à l'aide du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ (fig. 14). Ce coefficient indique dans quelle mesure un matériau fait obstacle ou non à la migration de vapeur. Plus la valeur μ est petite, plus l'isolant est ouvert au passage de la vapeur, sachant que le μ de référence est celui de l'air immobile, égal à 1. La résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu.d$ (ou S_d) d'une couche d'un matériau est définie par le produit de l'épaisseur d du matériau et de son coefficient μ , et s'exprime en mètre.

Un *matériau* est dit « *capillaire* » s'il possède la capacité d'absorber de l'eau liquide par capillarité, soit par contact direct avec un plan d'eau, soit par redistribution de l'humidité présente dans les pores de la matière qui le constitue. Selon



▲ Fig. 14. Échelle de valeurs détaillant le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ de 39 isolants (source : S. Trachte).

Jean-Pierre Moya, l'activité capillaire d'un matériau isolant peut être déterminée grâce au coefficient d'absorption d'eau A et au coefficient de transfert d'eau par redistribution D_w [75]. Le coefficient d'absorption d'eau A est une valeur propre à chaque matériau qui indique la quantité d'eau liquide absorbée par celui-ci en un temps donné. Il s'exprime en kilogramme par mètre carré, racine carrée de seconde. Le coefficient de transfert d'eau par redistribution D_w est une valeur calculée par matériau qui indique la vitesse de propagation de l'eau contenue dans celui-ci. Il s'exprime en mètre carré par seconde.

Un *matériau hygroscopique* est défini comme un matériau ayant la capacité d'absorber et de stocker de l'humidité en son sein lorsqu'il est mis en contact avec de l'air humide, et ce, en fonction de l'humidité relative Φ de l'air ambiant et de la saison. L'hygroscopicité d'un matériau peut être évaluée grâce à la courbe de sorption (ou « isotherme de sorption »), qui associe, en abscisse, l'humidité relative et, en ordonnée, la teneur en eau (fig. 15). Plus l'aire sous la courbe de sorption est grande et plus le matériau est hygroscopique.

Ces courbes n'étant pas régulièrement mises à disposition par les producteurs et fabricants d'isolants, il est également possible de se référer à la teneur en eau de référence W_{80} (kg/m^3) [75], qui caractérise la teneur en eau d'un matériau

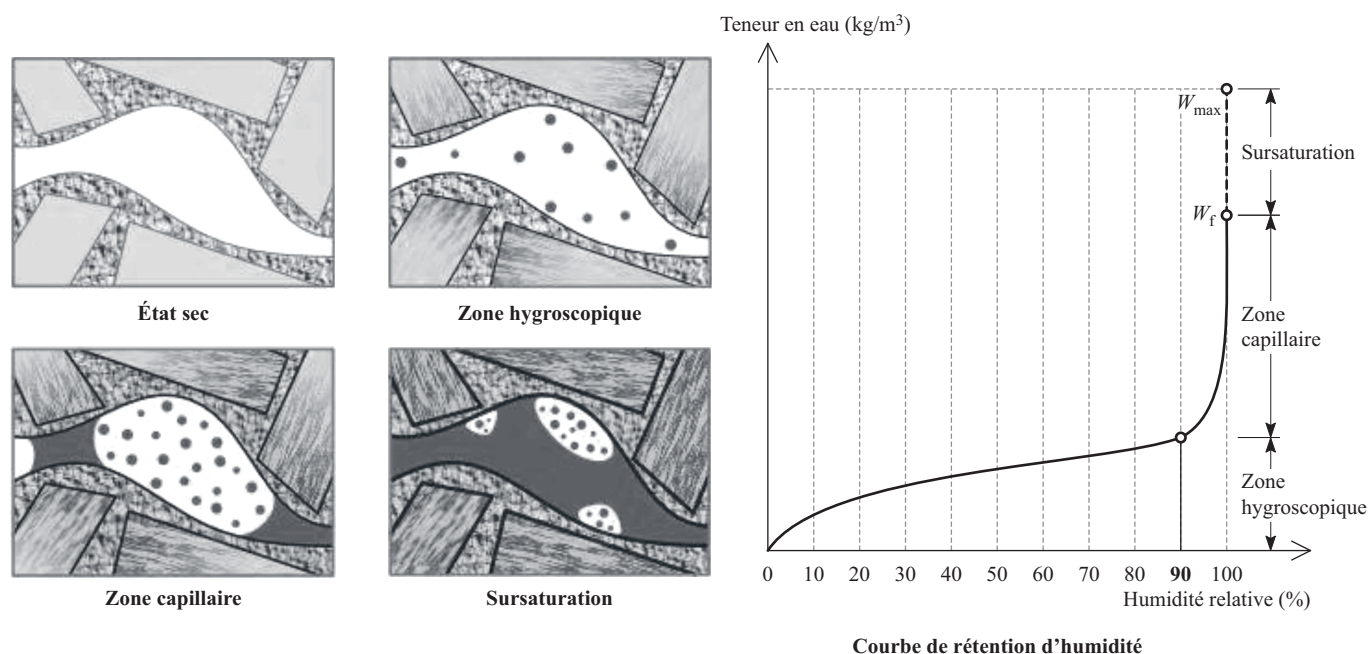
lorsqu'il est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80 %. Plus cette grandeur est élevée et plus le matériau est hygroscopique.

Les matériaux isolants, qu'ils soient conventionnels ou bio-sourcés, ne sont pas systématiquement caractérisés par rapport à ces propriétés malgré l'existence de normes européennes spécifiques proposant la procédure de test et d'évaluation à suivre. De ce fait, les données relatives à ces propriétés hygrométriques sont encore souvent absentes des fiches techniques proposées par les producteurs. De même, elles sont peu recensées dans la littérature scientifique.

4.3 La durabilité ou la pérennité des isolants biosourcés

De manière générale, la durabilité des isolants, biosourcés ou conventionnels, dépend principalement de la qualité de leur mise en œuvre et des éventuels dégâts subis au cours de leur cycle d'utilisation.

La longévité ou la pérennité d'un matériau exprime de manière globale sa résistance aux attaques biologiques telles que le développement de champignons. Un autre aspect en lien avec



▲ Fig. 15. Courbe de sorption ou de rétention d'humidité (source : A. Evrard, A. Branders, A. De Herde, *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines* [77]).

la résistance dite « naturelle » est le caractère imputrescible du matériau, qui définit sa capacité à supporter un passage d'eau accidentel et ponctuel sans se dégrader ou s'altérer durablement. En effet, pour la plupart des matériaux d'isolation thermique, la présence d'eau en quantité importante peut réduire considérablement la conductivité thermique et provoquer l'apparition de micro-organismes.

Étant issus de la biomasse, les isolants biosourcés présentent une sensibilité à l'eau et un risque accru aux attaques biologiques [76] [78], à l'exception du liège, considéré comme imputrescible, ou encore du chanvre, reconnu pour ses propriétés naturellement antifongiques et antibactériennes. Concernant les attaques d'insectes, certains isolants comme le liège, le chanvre et la paille de riz sont considérés comme naturellement répulsifs [79]. Pour les autres isolants, plus sensibles, des traitements fongicides et insecticides sont envisageables et souvent utilisés, mais ceux-ci peuvent altérer le caractère naturel de l'isolant.

Les matériaux isolants peuvent également être affectés par la présence ou le passage de rongeurs, bien que cette spécificité ne fasse pas encore l'objet d'une évaluation selon des critères établis et normalisés. La plupart des isolants représentent, en effet, un habitat idéal pour les rongeurs, tant en extérieur qu'en intérieur. Cependant, des solutions constructives adaptées permettent d'éviter l'apparition et l'installation de ces petits animaux, comme des membranes rigides, des parements solides et continus, ou encore des grilles métalliques au pied des murs. Il est à souligner que certains isolants, comme le chanvre ou

le ballot de paille, sont naturellement résistants aux rongeurs. Les autres matériaux, plus sensibles, peuvent recevoir un traitement spécifique lors du procédé de fabrication.

Un dernier aspect relatif à la pérennité des isolants biosourcés est la réaction au feu. Cette propriété définit l'aptitude d'un matériau à alimenter le feu ou la manière dont celui-ci se comporte en tant que « combustible ». Selon la norme NF EN 13501-1 de 2018 [80], un matériau peut être qualifié :

- d'*inflammable* ou de *non inflammable* selon sa tendance à dégager des gaz susceptibles de produire des flammes ;
- de *combustible* ou de *non combustible* selon sa propension à transmettre la chaleur en fonction de l'échauffement.

Imposée dans le cadre du marquage CE pour la mise en vente d'un produit de construction sur le marché européen, cette propriété est évaluée par des méthodes d'essai normalisées. Elle est définie par le système de classification européen des Euroclasses, qui comprend sept classes de réaction au feu, selon une échelle allant des classes A1 et A2 pour les produits non combustibles, à la classe E pour les produits très inflammables et propagateurs de flammes, et à la classe F pour les produits non classés ou non testés.

Ainsi, comme l'indique le tableau 3, un certain nombre d'isolants biosourcés font l'objet de traitements fongicides et insecticides. La plupart présentent une réaction au feu de classe E. Des isolants ayant fait l'objet d'un traitement au feu particulier, comme certains matelas de lin, de coton recyclé et de cellulose recyclée, présentent une réaction au feu de classe B

▲ Tab. 3. Apport d'adjuvants et résistance naturelle des isolants biosourcés (source : S. Trachte).

Isolants	Adjuvants (fongicides, retardateurs de flamme)	Caractère imputrescible	Sensibilité aux insectes et rongeurs	Classe de réaction au feu (selon NF EN 13501-1)
Paille de céréales	Sans adjuvant	Putrescible	Insensible	Classe E
Paille de riz	NS ⁽¹⁾	Imputrescible	Insensible	Classe E
Balles de céréales	Sans adjuvant	NS	Très sensible	NS
Balles de riz	Sans adjuvant	NS	Très sensible	Classe C-s2, d0
Liège – granules	NS	Imputrescible	Peu sensible	Classe B2 à E
Liège – panneau rigide	NS	Imputrescible	Peu sensible	Classe E
Fibres de chanvre – matelas souple	Fongicides et retardateurs de flammes	Moyennement putrescible	Insensible	Classe E
Fibres d'herbe – matelas souple	Polyphosphate d'ammonium, urée et silice	Moyennement putrescible	Peu sensible	Classe E
Fibres de lin – matelas souple	Sels de phosphate d'ammonium	Difficilement putrescible	Sensible	Classe C-s2
Chanvre – granules	Fongicides	Moyennement putrescible	Insensible	Classe E
Chaux-chanvre – bloc rigide	Sans adjuvant	Moyennement putrescible	Peu sensible	Classe B-s1, d0
Fibres de chanvre et cellulose	Sels de phosphate d'ammonium	Moyennement putrescible	Sensible	Classe E
Fibres de chanvre et coton	Antimites, fongicides	Moyennement putrescible	Sensible	Classe E
Fibres de chanvre et lin	Fongicides et retardateurs de flammes	Difficilement putrescible	Moyennement sensible	Classe E
Fibres de chanvre, lin et coton	Fongicides et retardateurs de flammes	Moyennement putrescible	Sensible	Classe E
Mycelium	NS	Imputrescible	NS	NS
Miscanthus et chaux – bloc rigide	Sans adjuvant	NS	Moyennement sensible	NS
Roseaux – panneau rigide	Sans adjuvant	Imputrescible	Très sensible	NS
Fibres de bois en vrac	Sels d'ammonium, sels de bore	Potentiellement putrescible	Sensible	Classe E
Fibres de bois – matelas souple	Ammonium polyphosphate, borates	Potentiellement putrescible	Sensible	Classe E
Fibres de bois – panneau rigide	Fongicides et retardateurs de flammes	Potentiellement putrescible	Sensible	Classe E
Granulés de bois	Sels de bore	Potentiellement putrescible	Très sensible	NS
Laine de mouton – matelas	Antimites, retardateurs de flammes	Sensible	Sensible	Classe E
Cellulose recyclée – flocons	Acide borique, sels de bore, sels d'ammonium, sulfate de magnésium	Moyennement putrescible	Sensible	Classe B-s1, d0 à E
Cellulose recyclée – granules	NS	Moyennement putrescible	Sensible	Classe E
Fibres de coton recyclé en vrac	Fongicides et retardateurs de flammes	Difficilement putrescible	Sensible	Classe B-s2, d0 à F
Fibres de coton recyclé – matelas souple	Fongicides et retardateurs de flammes	Difficilement putrescible	Sensible	Classe D-s2, d0 à E

(1) NS : non spécifié.

à D. Seuls les panneaux et blocs de chaux-chanvre ont une réaction au feu de classe B, grâce à la présence de chaux.

En conclusion, les isolants biosourcés peuvent être considérés comme des matériaux équilibrés qui, au-delà d'une bonne conductivité thermique, offrent également d'autres propriétés intéressantes en termes de confort et de qualité d'ambiance intérieure, comme une masse volumique et une capacité thermique plus élevées que les isolants synthétiques. La plupart présentent une porosité ouverte permettant la circulation et le changement de phase de l'eau contenue dans le matériau. Ce comportement « hygrothermique dynamique » joue un rôle de régulateur d'humidité [70] qui permet aux isolants biosourcés d'être considérés comme perspirants ou ouverts à la vapeur d'eau, à l'instar des matériaux anciens. La plupart sont aussi hygroscopiques et certains sont également capillaires.

Si des recherches tentent encore d'améliorer leur pérennité (comportement à l'eau, au feu et aux nuisibles), ces matériaux ont déjà acquis une maturité technique et normative, justifiée par les agréments techniques et/ou les certificats Acermi [81] dont ils font l'objet. Cette maturité leur permet de concurrencer les isolants conventionnels. C'est le cas de la fibre de bois, de la cellulose recyclée, du chanvre et de la paille, qui prennent chaque année des parts de marché de plus en plus importantes.

5 Applications en réhabilitation et atouts constructifs

Un des préalables à toute opération de réhabilitation est l'établissement d'un diagnostic complet du bâtiment sur lequel l'intervention est envisagée. Ce diagnostic, outre les aspects de performance énergétique et d'identification des potentielles pathologies, permet de déterminer les différents matériaux constituant les parois du bâtiment, ainsi que leur nature, leur épaisseur, leur assemblage et leur état. Il permet aussi de comprendre comment fonctionne le bâtiment d'un point de vue thermique et hygrométrique, mais également de déterminer l'usage des différents espaces à isoler. Ces informations sont indispensables pour pouvoir faire un choix d'isolant adapté tant aux spécificités constructives du bâtiment qu'à son usage.

5.1 Choix des matériaux selon leur localisation dans le bâtiment

Une des principales caractéristiques des isolants biosourcés est la variété de natures et de formes qu'ils présentent. Ces natures et formes peuvent offrir, pour chacune des parois de l'enveloppe, une réponse adaptée au besoin d'isolation du bâtiment et de la paroi étudiés.

Chaque nature et chaque forme d'isolant présentant des atouts et des contraintes, la sélection de la solution technique et maté-

rielle repose sur une approche multicritère tenant compte à la fois des spécificités matérielles de la paroi à isoler, mais également des contraintes de durabilité, de résistance mécanique, d'assemblage et de mise en œuvre.

5.1.1 Matériaux en vrac

Les isolants biosourcés en vrac, sous forme de granules, de copeaux ou de flocons de fibres ont une très faible résistance à la compression (photo 8). Très flexibles et compressibles, ils permettent un remplissage total des espaces à isoler ainsi qu'un calfeutrement efficace des raccords et des joints. En revanche, ils nécessitent dans la plupart des cas un caisson préfabriqué ou une structure fermée pour les maintenir sur toute la surface de la paroi à isoler. Dans le cas des planchers de combles non utilisables, ils peuvent être mis en œuvre en pose libre sur le support existant ou sur une membrane souple.

En ce qui concerne leur mise en œuvre, ces isolants sont soit déversés, soufflés ou insufflés sous pression, soit projetés après avoir été mélangés à un liant. Les processus d'épandage, de projection et d'insufflation permettent d'atteindre des espaces plus difficiles d'accès, mais nécessitent la plupart du temps le recours à une entreprise de placement qualifiée et à un outillage spécifique. Cette mise en œuvre s'effectue rapidement, sans assemblages ni connecteurs, principalement dans les systèmes constructifs dits « à charpente » ou « à ossature », comme les toitures à versants, les planchers en bois et les murs de façade, mais également dans des modules préfabriqués, généralement en bois.

Les isolants biosourcés sous forme de vrac génèrent moins de déchets que ceux sous forme de panneaux ou de matelas. En effet, leur fabrication comme leur mise en œuvre génèrent peu, voire pas, de pertes de matière, contrairement aux chutes



▲ Photo 8. Isolants biosourcés en vrac, mis en œuvre entre ossatures : fibres de bois issues de la valorisation de déchets de MDF recyclé, insufflées en caisson (source : Lenoo).

produites lors de la découpe et de l'ajustement des panneaux et matelas sur chantier. En revanche, leur démontage, leur collecte et leur stockage après un premier cycle d'utilisation nécessitent davantage de temps et de manipulation. En effet, une fois sorti de son conditionnement initial sous vide, l'isolant devient volumineux et difficile à manipuler sans équipement adapté.

Dans la gamme très variée des isolants biosourcés en vrac, les flocons de cellulose recyclée restent les plus utilisés. Cependant, d'autres isolants, comme le liège en vrac, les granules de chènevotte, les balles de céréales ou les granules et flocons de fibres de bois, sont également de plus en plus fréquemment mis en œuvre.

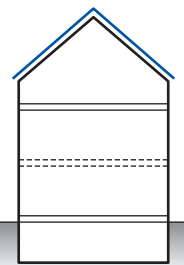
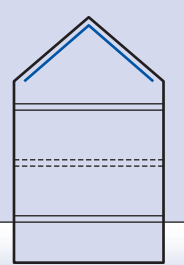
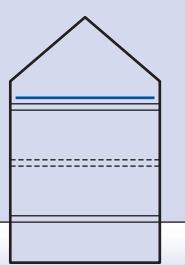
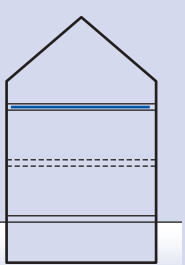
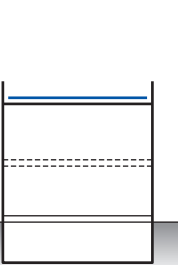
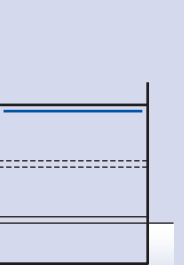
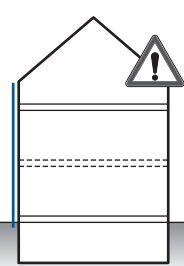
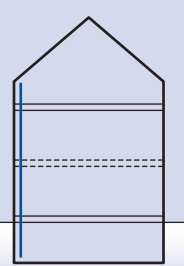
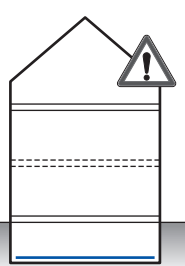
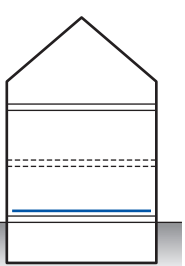
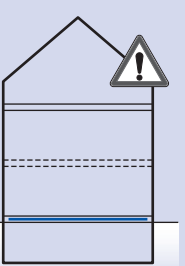

En rénovation énergétique, ces matériaux peuvent être envisagés dans de nombreuses applications (tab. 4).

5.1.2 | Matériaux sous forme de matelas souple

Les isolants biosourcés en matelas flexibles présentent une densité légèrement supérieure à celle des isolants en vrac, tout en conservant leur souplesse et leur maniabilité lors de la pose sur chantier.

Leur faible résistance à la compression impose une mise en œuvre entre des éléments de structure rigide (ossature bois ou métal) et leur protection par un parement de finition adapté. Cette mise en œuvre se fait généralement par friction ou par serrage entre éléments d'ossature sans fixation mécanique, ce qui facilite un remplissage homogène des cavités et assure une bonne étanchéité des raccords (photo 9). Toutefois, leur utilisation en parois verticales nécessite une vigilance particulière quant au risque de tassement dans le temps.

▲ Tab. 4. Applications des isolants biosourcés en vrac dans le cadre de travaux de rénovation énergétique (source : S. Trachte).

Isolation de la toiture					
Versant Par l'extérieur	Toit à versant Par l'intérieur, entre structure	Toit à versant Plancher des combles, sur la structure	Toit à versant Plancher des combles, entre structure	Toit plat Par l'extérieur, sur la structure	Toit plat Par l'intérieur, entre structure
					
Avec l'ajout d'une structure complémentaire		Avec l'ajout d'une structure complémentaire		Avec l'ajout d'une structure complémentaire	
Isolations des façades			Isolations des dalles et planchers		
Par l'extérieur	Par l'intérieur	Dalle sur terre-plein	Plancher de cave Sur la structure	Plancher de cave Entre structure	Plancher de cave Sous la structure
					
Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	

Les applications les plus fréquentes sont signalées en bleu clair. Les points d'exclamation en rouge expriment une attention particulière à l'étanchéité à l'eau lors de la mise en œuvre.



▲ Photo 9. Isolants biosourcés sous forme de matelas souples, mis en œuvre entre structures : (a) fibres d'herbe, (b) fibres de bois et (c) paille en ballot mise en œuvre dans un caisson bois (source : Gramitherm (a), D. Stiernon (b), S. Trachte (c)).

Si la fabrication et le placement sur chantier engendrent des chutes, généralement limitées à une faible part du volume placé, les isolants sous forme de matelas présentent une facilité de manipulation, de collecte et de stockage lors de leur démontage, ce qui facilite et encourage leur réemploi.

Si les isolants les plus utilisés actuellement en France sous forme de matelas sont les laines minérales, les isolants biosourcés – tels que la fibre de bois, la fibre de chanvre, les fibres mélangées et le coton recyclés – prennent chaque année de nouvelles parts de marché. En Belgique, outre la fibre de bois, les matelas en fibres d'herbe et en laine de mouton sont également utilisés.

En rénovation énergétique, ces matériaux peuvent s'envisager dans le cadre de différentes applications (tab. 5).

5.1.3 | Matériaux sous forme de panneau ou de bloc rigide et incompressible

Les isolants biosourcés sous forme de panneau ou de bloc rigide se distinguent principalement par leur bonne résistance à la compression, leur permettant de contribuer aux efforts structuraux (par exemple en isolation sous dalle) ou de recevoir directement un enduit de finition dans le cadre d'une ITE. Le liège expansé, en plus de sa résistance mécanique, présente une excellente tenue à l'humidité et est imputrescible, ce qui en fait un matériau durable dans des environnements exposés.

En revanche, les panneaux rigides, en raison de leur densité et de leur manque de flexibilité, sont plus difficiles à manipuler sur chantier et sont peu adaptés aux surfaces irrégulières ou aux formes complexes. Leur mise en œuvre nécessite généralement des systèmes de fixation mécanique, de collage, ou une combinaison des deux. Toutefois, l'usage de colle compromet la réversibilité des assemblages, limitant ainsi leur potentiel de démontabilité et de réemploi.

Les isolants biosourcés sous forme de panneaux ou de blocs rigides sont le liège – expansé ou non –, la fibre de bois et le chanvre. Si la fibre de bois est déjà bien présente sur le marché français et européen, le chanvre est également de plus en plus utilisé, principalement en isolation de murs (ITI ou ITE) et en dalle de sol. Malgré ses qualités en termes de durabilité et de performance structurelle, le liège expansé demeure un matériau onéreux, ce qui constitue un frein à sa généralisation dans les projets de construction ou de rénovation.

En rénovation énergétique, ces matériaux peuvent s'envisager dans plusieurs cas (tab. 6).

5.2 | Points de vigilance lors de la mise en œuvre

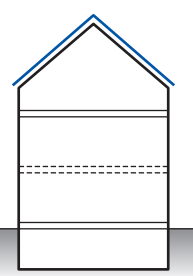
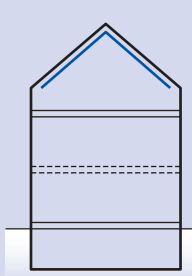
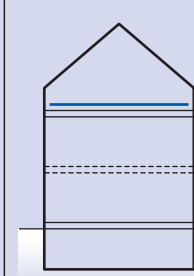
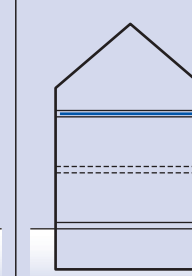
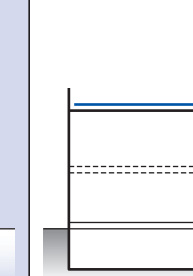
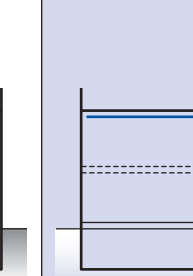
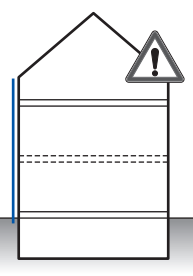
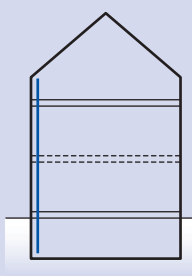
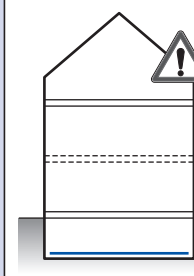
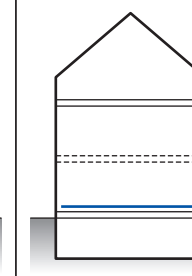
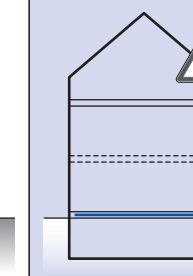
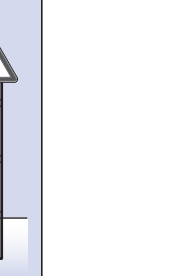
En raison de leur caractère hygroscopique, perspirant et capillaire, la mise en œuvre des isolants biosourcés requiert une attention particulière, au-delà de la qualité généralement requise pour la mise en œuvre des travaux de rénovation, afin d'éviter tout risque de dégradation de l'isolant et de la paroi qu'il protège.

5.2.1 | Mise en place d'un pare-vapeur, d'un freine-vapeur ou d'une membrane intelligente

Lorsqu'on isole par l'intérieur – ce qui est fréquemment le cas en rénovation –, il est essentiel de prendre en considération le risque de condensation lié au transfert de vapeur d'eau dans la paroi isolée. Ce transfert de vapeur d'eau est généré, en fonction des saisons et des circonstances, par les différences de climat entre les ambiances intérieures du bâti et l'atmosphère extérieure.

Deux risques de condensation peuvent apparaître dans nos climats tempérés. *Le principal a lieu en hiver, période à laquelle*

▲ Tab. 5. Applications des isolants biosourcés sous forme de matelas dans le cadre de travaux de rénovation énergétique (source : S. Trachte).

Isolation de la toiture					
Versant Par l'extérieur	Toit à versant Par l'intérieur, entre structure	Toit à versant Plancher des combles, sur la structure	Toit à versant Plancher des combles, entre structure	Toit plat Par l'extérieur, sur la structure	Toit plat Par l'intérieur, entre structure
					
Avec l'ajout d'une structure complémentaire		Avec l'ajout d'une structure complémentaire		Avec l'ajout d'une structure complémentaire	
Isolations des façades			Isolations des dalles et planchers		
Par l'extérieur	Par l'intérieur	Dalle sur terre-plein	Plancher de cave Sur la structure	Plancher de cave Entre structure	Plancher de cave Sous la structure
					
Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	Avec l'ajout d'une structure complémentaire	

Les applications les plus fréquentes sont signalées en bleu clair. Les points d'exclamation en rouge expriment une attention particulière à l'étanchéité à l'eau lors de la mise en œuvre.

les transferts de vapeur se font principalement de l'ambiance intérieure (plus chaude et plus humide) vers l'environnement extérieur. L'air chargé de vapeur d'eau se déplace dans les parois par diffusion au sein des matériaux. En traversant progressivement les différentes couches de la paroi, la vapeur d'eau se rapproche de l'extérieur tandis que sa température diminue. Lorsqu'elle atteint le point de rosée, elle se condense, générant de l'humidité, souvent localisée à l'arrière ou à l'intérieur de l'isolant, à proximité de la paroi en maçonnerie plus froide. Cette humidité peut provoquer la dégradation des matériaux constituant la paroi et, par conséquent, compromettre sa durabilité, ses performances thermiques ainsi que le confort et la santé des occupants.

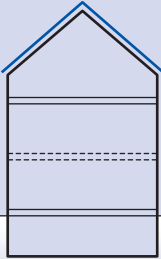
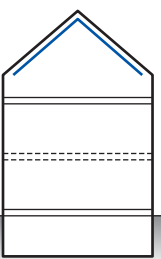
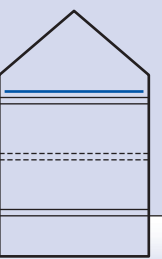
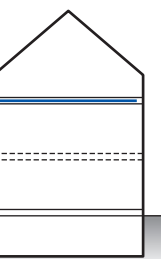
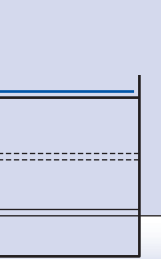
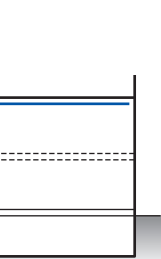
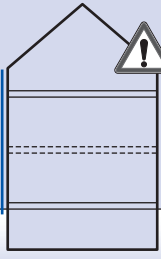
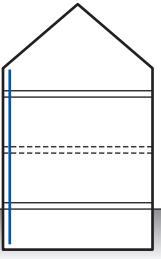
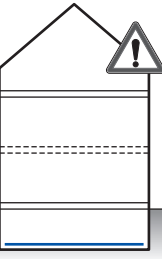
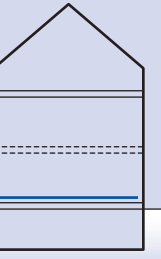
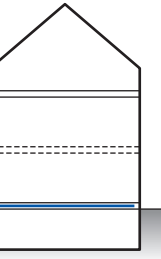
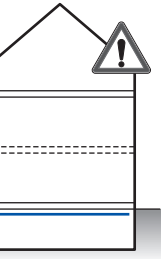
Pour prévenir ce *risque de condensation hivernal* en rénovation, il est essentiel d'installer, entre l'isolant et l'ambiance

intérieure, une couche relativement imperméable à la vapeur d'eau : le pare-vapeur ou le freine-vapeur. Ce matériau remplit trois rôles [82] :

- limiter la condensation excessive au sein de la paroi ;
- empêcher l'isolant d'absorber l'humidité par capillarité depuis les éléments de construction voisins ;
- garantir l'étanchéité à l'air de l'enveloppe.

Cependant, si la membrane est trop imperméable – ce qui est le cas pour le pare-vapeur –, elle peut empêcher le mur de sécher vers l'intérieur durant les saisons chaudes, entraînant ainsi une accumulation d'humidité dans les matériaux et une augmentation du *risque de condensation estivale*. Ce risque apparaît au printemps et en été, car l'air extérieur, souvent plus chaud et plus humide que l'air intérieur, crée un flux de vapeur de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment. Si une

▲ Tab. 6. Applications des isolants biosourcés sous forme de panneaux rigides dans le cadre de travaux de rénovation énergétique (source : S. Trachte).

Isolation de la toiture					
Versant Par l'extérieur	Toit à versant Par l'intérieur, entre structure	Toit à versant Plancher des combles, sur la structure	Toit à versant Plancher des combles, entre structure	Toit plat Par l'extérieur, sur la structure	Toit plat Par l'intérieur, entre structure
					
Système Sarking, avec possibilité de préfabrication					
Isolations des façades			Isolations des dalles et planchers		
Par l'extérieur	Par l'intérieur	Dalle sur terre-plein	Plancher de cave Sur la structure	Plancher de cave Entre structure	Plancher de cave Sous la structure
					
Système Etics, vêtageou bardagev					

Les applications les plus fréquentes sont signalées en bleu clair. Les points d'exclamation en rouge expriment une attention particulière à l'étanchéité à l'eau lors de la mise en œuvre.

membrane imperméable bloque cette vapeur, celle-ci peut se condenser entre la membrane et l'isolant, humidifier ce dernier, en réduire les performances et, en présence de matériaux organiques, favoriser l'apparition de moisissures.

C'est pourquoi, notamment avec l'usage d'isolants biosourcés capables de répartir l'humidité dans la paroi et de limiter le risque de condensation, le recours à des membranes freine-vapeur ou à des membranes dites « intelligentes » est à privilégier. Contrairement au pare-vapeur, le freine-vapeur, plus perméable, permet une circulation bidirectionnelle de la vapeur d'eau. Il offre ainsi une protection contre le risque dit « secondaire » de condensation interne, notamment lorsque la pression de vapeur est plus élevée à l'extérieur, favorisant un flux vers l'intérieur du bâtiment. De son côté, la membrane intelligente régule plus efficacement la vapeur d'eau en adaptant sa perméabilité à l'humidité ambiante : elle devient plus

étanche en hiver, lorsque l'air intérieur est sec, limitant la pénétration de vapeur. En été, elle s'ouvre davantage, permettant à l'humidité résiduelle de s'évacuer vers l'intérieur et favorisant le séchage des parois.

5.2.2 | Qualité de l'étanchéité à l'air

Il existe un lien direct entre la qualité de l'étanchéité à l'air et le transfert de vapeur d'eau, l'air constituant le principal vecteur de transport de cette vapeur. Pour cette raison, une mauvaise étanchéité à l'air peut contribuer au développement de phénomènes de condensation au sein de la paroi.

La qualité de l'étanchéité à l'air dépend surtout de la qualité des matériaux et de la qualité de leur mise en œuvre, tandis que la perméabilité à la vapeur est déterminée exclusivement par la nature même de ces matériaux. Ainsi, une paroi étanche

à l'air peut être soit perméable, soit imperméable à la diffusion de la vapeur d'eau, selon la nature des matériaux constituant le complexe de paroi.

La couche d'étanchéité a pour fonction d'assurer la continuité de la barrière à l'air de l'enveloppe du bâtiment en limitant les flux d'air parasites susceptibles de compromettre la performance thermique et hygrothermique des parois. Le pare-vapeur ou le freine-vapeur, quant à eux, visent à contrôler la migration de la vapeur d'eau au sein des parois afin d'éviter les phénomènes de condensation interne et d'engendrer des désordres. Par nature, un pare-vapeur agit également comme étanchéité à l'air. L'inverse n'est cependant pas vrai : une étanchéité à l'air ne remplit pas nécessairement les fonctions d'un pare-vapeur.

5.2.3 | Qualité de l'étanchéité à l'eau

La présence de forte humidité et/ou d'eau liquide est un facteur clé dans le développement de moisissures. La présence d'humidité dans les parois, principalement lors de la rénovation du bâti ancien, peut résulter de remontées capillaires, de la formation de ponts thermiques ou d'une mauvaise mise en œuvre de l'étanchéité à l'eau.

Les isolants biosourcés, malgré leur capacité à absorber et à restituer l'humidité, sont sensibles à l'eau liquide ou à une forte humidité constante. Ils présentent alors des risques de développement microbien, principalement lorsqu'ils sont placés dans des conditions de saturation permanente d'humidité. Il convient toutefois de souligner que certains isolants biosourcés, comme le liège, sont peu sensibles à l'humidité et que les additifs antimicrobiens peuvent aussi fournir un certain degré de protection.

C'est pourquoi, lorsque les isolants biosourcés sont placés en ITE, il convient de prévoir :

- une rehausse de 20 cm par rapport au sol, afin d'éviter le contact direct de l'isolant avec un sol humide, des projections d'eau et/ou de possibles remontées capillaires. La rehausse de 20 cm est réalisée à l'aide d'un isolant non sensible à l'humidité ;
- une membrane d'étanchéité posée de manière continue sur toute la surface isolée ;
- un bardage ventilé facilitant le séchage de l'isolant si celui-ci devait être accidentellement humidifié.

Il est déconseillé de placer un isolant biosourcé dans un vide sanitaire ventilé, ce dispositif n'étant généralement pas assez ventilé, ni dans une cave humide présentant des remontées capillaires non traitées. Aucun isolant biosourcé ne doit être utilisé en isolation extérieure enterrée.

EN SAVOIR PLUS

Pour approfondir les applications possibles des différentes formes d'isolants biosourcés, les points d'attention liés à leur mise en œuvre et les détails techniques correspondants, nous vous invitons à consulter la publication du centre de recherche belge Buildwise « Guide pratique des isolants biosourcés/recyclés et de leur mise en œuvre » [11].

6 | Le bilan environnemental des isolants biosourcés en rénovation : aller au-delà du bilan carbone

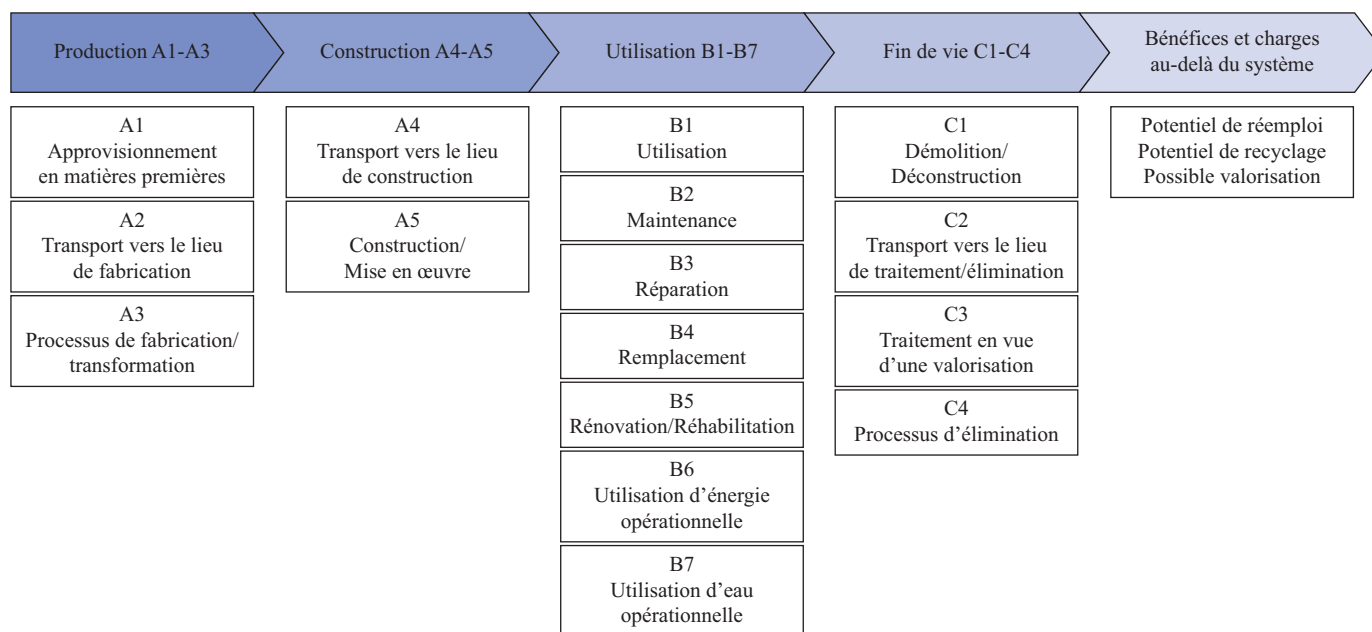
6.1 | ACV, état des lieux et perspectives

Selon la norme ISO 14040, une analyse de cycle de vie (ACV) est « une étude traitant des aspects environnementaux et des impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'acquisition des matières premières à sa production, son utilisation, son traitement en fin de vie, son recyclage et sa mise en rebut » [83].

Si les isolants biosourcés, du fait de la biomasse qui les compose, ont la particularité de stocker du carbone biogénique sur leur durée d'utilisation et constituent ainsi un atout pour répondre à l'objectif de neutralité carbone dans le secteur de la construction, ils doivent, comme tout autre isolant et/ou matériau de construction, faire l'objet d'une ACV pour justifier leur impact global sur l'environnement [85]. En effet, si la réduction des émissions de carbone dans l'atmosphère représente un enjeu majeur, ce critère ne permet pas à lui seul de juger du caractère écoresponsable d'un matériau. Il doit être mis en perspective avec d'autres indicateurs désormais intégrés dans les analyses de cycle de vie (ACV), tels que la consommation de ressources abiotiques, la consommation en eau ou la contribution à d'autres types de pollutions terrestre ou atmosphérique.

L'ACV est la méthode scientifique quantitative actuellement utilisée pour identifier, quantifier et évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un matériau ou d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie. Fondée sur la définition de l'unité fonctionnelle et du flux de référence d'un produit ou d'un matériau, cette méthode s'appuie sur un inventaire complet de tous les flux entrants – ce qui est consommé en termes de matières premières et d'énergie – et sortants – ce qui est rejeté comme déchets, éliminé ou émis dans l'air, l'eau et dans le sol. Cet inventaire permet d'identifier, de quantifier et d'agréger les résultats obtenus en une série d'impacts environnementaux, en tenant compte des différentes étapes du cycle de vie. Chacune de ces étapes reprend elle-même plusieurs modules (fig. 16) :

- l'étape de *production* et de *fabrication* (modules A1 à A3) comprend ainsi l'extraction ou l'apport de matières premières, leur transport jusqu'au site de production et les différentes transformations nécessitées par la fabrication du produit ou du matériau ;
- l'étape de *mise en œuvre* ou de *construction* (modules A4 à A5) comprend le transport du matériau du site de production vers le chantier et sa mise en œuvre sur chantier ;
- l'étape d'*utilisation* ou de « *vie en œuvre* » (modules B1 à B7) comprend la maintenance, l'entretien, les réparations éventuelles et les remplacements. Dans le cas d'une ACV de bâtiment complet, la consommation d'énergie et d'eau nécessaire à son exploitation est également prise en compte ;



▲ Fig. 16. Modules et étapes du cycle de vie considérés par l'ACV (source : S. Trachte, sur la base du schéma disponible sur le site de la base Inies [84]).

– l'étape de *fin de vie* (modules C1 à C4), enfin, comprend le démontage ou la démolition, le tri éventuel, le transport du chantier vers le lieu du traitement final ainsi que la gestion du matériau en tant que déchet (mise en décharge, incinération, traitement en vue du recyclage).

La prise en compte de ces quatre premières étapes permet de réaliser des analyses dites « du berceau à la tombe »⁽⁴⁾.

Un dernier module (module D) fournit des informations concernant le *potentiel de réutilisation, de recyclage et/ou de récupération d'énergie du matériau*. Ce module, malgré le bénéfice environnemental qu'il présente – notamment pour la phase de production future –, n'est pas encore toujours intégré et étudié lors de la réalisation d'une ACV. L'intégration à part entière de ce module D dans l'ACV d'un matériau permet cependant de réaliser une analyse dite « du berceau au berceau »⁽⁵⁾ et de soutenir ainsi la mise en place d'une économie circulaire dans le secteur industriel de la construction en favorisant le réemploi et le recyclage.

L'ACV permet ainsi d'estimer l'impact environnemental d'un produit, d'une paroi ou d'un bâtiment, mais également d'optimiser des choix constructifs et matériels afin de réduire cet impact. Elle peut s'appliquer aussi bien aux travaux de construction neuve qu'aux opérations de rénovation ou d'extension.

Les principes de base ainsi que la méthodologie et la déontologie de l'ACV sont régis, depuis 2006, par les normes

internationales ISO 14040 [83] et ISO 14044 [86]. D'autres normes s'appliquent plus spécifiquement en matière de déclaration environnementale des produits de construction et des bâtiments : il s'agit des normes ISO 14025 [87] et NF EN 15804+A2 [88]. À la suite des réflexions du groupe de travail CEN/TC 350 [89] sur l'harmonisation avec la méthode « Product Environmental Footprint » (PEF) de l'UE, cette seconde norme a été complétée par deux amendements conduisant, entre autres, à un élargissement du nombre d'indicateurs obligatoires. L'amendement A2, adopté en 2019, entraîne notamment la modification du domaine d'application et du paragraphe sur la vérification et la validité d'une DEP. De nouveaux paragraphes ont été ajoutés – tels ceux portant sur l'unité fonctionnelle ou déclarée, les informations sur la teneur en carbone biogénique, les indicateurs décrivant l'utilisation des ressources ou encore les informations environnementales décrivant les catégories de déchets – ainsi que des annexes informatives sur de nouvelles méthodes de calcul en fin de vie.

Toutes ces normes européennes ont été traduites dans le système normatif de chaque État membre, notamment en France *via* les normes « NF » de l'Afnor.

De ces analyses peuvent découler différents types de « marquages », tels que des labels écologiques (marquage de type 1, selon la norme ISO 14024 [90]), ainsi que des déclarations environnementales de produit (DEP), comme les FDES (marquage de type 3, selon la norme ISO 14025 [87]).

Le tableau 7, issu de l'ouvrage *Isolants thermiques en rénovation...* [13], présente l'ensemble des indicateurs actuellement pris en compte dans l'ACV, ainsi que leurs unités de calcul

(4) Cradle-to-grave analysis.

(5) Cradle-to-cradle analysis.

▲ Tab. 7. Indicateurs environnementaux repris dans la norme NF EN 15804+A2 [88] (source : S. Trachte et D. Stiernon (2023)).

	Catégories d'impact	Unité utilisée par unité fonctionnelle
Réchauffement climatique	Potentiel de réchauffement climatique sur 100 ans dû aux émissions de GES en identifiant les émissions totales, les émissions dues aux combustibles fossiles et à l'utilisation des sols, et les émissions relatives au carbone biogénique	kg CO ₂ éq.
Appauvrissement de la couche d'ozone	Quantifie les émissions de gaz chlorofluorocarbures	kg CFC-11 éq.
Acidification des sols et de l'eau	– Caractérise l'augmentation de la quantité de substances acides dans la basse atmosphère – Parmi les composés qui participent à ce phénomène, peuvent être cités SO ₂ , NO _x , NH ₃ , HCl et HF	kg SO ₂ éq., remplacé en 2019, en alignement avec la méthode PEF, par l'unité mol H ⁺ éq.
Eutrophisation des écosystèmes	– Évalue l'enrichissement des écosystèmes en matières nutritives engendrés par les émissions de nitrates, nitrites, phosphates, azote, phosphore – Reprend l'eutrophisation terrestre, et l'eutrophisation des eaux douces et des eaux marines	– mol N éq. – kg P éq. – kg N éq.
Formation d'ozone photochimique	Quantifie les émissions d'oxydes d'azote et composés organiques volatils provoquant la formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère	kg éthène éq.
– Épuisement des ressources abiotiques – Combustibles fossiles	Utilisation des combustibles fossiles (énergie finale) dans les étapes de transformation du cycle de vie	MJ, valeur calorique nette
– Épuisement des ressources abiotiques – Minéraux et métaux	Quantifie l'épuisement des ressources naturelles par l'utilisation des matières premières minérales et métalliques dans les étapes de transformation du cycle de vie	kg Sb éq.
Épuisement des ressources en eau	Quantifie l'épuisement des ressources en eau	m ³ d'eau
Émissions de particules – effet sur le système respiratoire	Évalue les décès prématurés ou les incapacités (handicap) provoqués par l'inhalation de particules fines	kg PM _{2,5} éq.
Toxicité humaine – effet sur le développement de cancers	Évalue les effets toxicologiques chroniques sur la santé humaine dus aux émissions de substances cancérigènes	CTU _h (unité comparative de toxicité pour l'humain)
Toxicité humaine – sans effet sur le développement de cancers	Évalue les effets toxicologiques chroniques sur la santé humaine dus aux émissions de substances non cancérigènes	CTU _h
Impacts des radiations ionisantes sur la santé humaine	Évalue l'effet des émissions radioactives sur la santé humaine	kg U ₂₃₅ éq.
Écotoxicité aquatique	– Évalue la toxicité de l'émission de substances sur les écosystèmes – Caractérise les risques induits par la présence des composés chimiques dans un système écologique spécifique	CTU _e (unité de toxicité des écosystèmes)
Occupation des terres	Quantifie l'occupation d'une certaine surface pendant un temps donné ainsi que la variation de la qualité du sol pendant cette occupation	Plusieurs unités de mesure peuvent être utilisées ici

respectives. Pour certains indicateurs, cette unité peut varier selon la méthode utilisée ; celles figurant dans ce tableau correspondent aux plus fréquemment utilisées.

En complément de ces indicateurs, les déclarations environnementales qui découlent de l'ACV reprennent également les informations suivantes (tab. 8).

Enfin, il est important de signaler que l'ACV est une méthode scientifique quantitative en constante évolution, puisqu'elle prend en considération uniquement les impacts environnementaux potentiellement connus et quantifiables. Au niveau scientifique, les méthodes d'évaluation de certains impacts sont encore en discussion [91] [92] [93], ainsi que la manière de quantifier ou d'estimer certains indicateurs.

En outre, selon les méthodes proposées par la norme NF EN 15978 de mai 2012 [94], l'ACV qui est la plus souvent réalisée en Europe – en particulier pour les déclarations françaises FDES – est une analyse dite « statique » qui ne prend pas en compte, pour les émissions de GES, la temporalité des émissions dans le cycle de vie. Chaque étape du cycle de vie participe de manière égale à l'impact, et ce, même si ces étapes

ne s'établissent pas au même moment et sont en réalité décalées les unes par rapport aux autres sur une échelle de temps.

Cette approche se distingue de l'ACV dite « dynamique » [95], rendue obligatoire par la réglementation environnementale RE 2020 [96] en France, qui envisage une pondération de l'impact des émissions en fonction de l'étape du cycle de vie où elles sont générées : plus une émission a lieu tôt dans le cycle de vie, plus son impact est important. Les émissions sont ainsi pondérées entre la phase de construction ($t = 0$) et la phase de démolition ou de fin de vie ($t =$ période d'étude de référence [PER]), qui est généralement évaluée à 60 ans pour les bâtiments). Les émissions de production et de construction sont considérées comme émises à $t = 0$ et sont comptabilisées à 100 %. Les émissions de fin de vie sont, par convention, considérées comme émises à $t =$ PER ; un coefficient de réduction d'environ 0,6 est alors appliqué.

Cette approche dynamique favorise certains matériaux, notamment les isolants biosourcés, qui libèrent en fin de vie le carbone biogénique fixé lors de la croissance de la biomasse et stocké durant leur cycle d'utilisation dans le bâtiment. Elle devrait à terme se généraliser dans les approches ACV [97].

▲ Tab. 8. Indicateurs complémentaires intégrés aux déclarations environnementales (source : S. Trachte et D. Stiernon (2023)).

	Unité utilisée par unité fonctionnelle	
Utilisation de ressources	Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ
	Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables en tant que matières premières	MJ
	Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ
	Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables en tant que matières premières	MJ
	Utilisation de matières secondaires	kg
	Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ
	Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ
	Utilisation d'eau douce	m ³
Catégorie de déchets	Déchets dangereux éliminés	kg
	Déchets non dangereux éliminés	kg
	Déchets radioactifs éliminés	kg
Flux sortant du système d'analyse	Composants destinés à la réutilisation	kg
	Matériaux destinés au recyclage	kg
	Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg
	Énergie exportée en distinguant électricité, vapeur et gaz	MJ pour type d'énergie utilisée

6.2 Analyse comparative entre isolants biosourcés sur la base des FDES

Une étude comparative de 25 isolants biosourcés a été réalisée sur la base des fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) françaises disponibles sur le site de la base Inies [69]. Ces isolants ont d’abord été analysés de manière comparative, puis confrontés à huit isolants thermiques « conventionnels ».

L’ensemble des déclarations FDES utilisées pour l’étude ont d’abord été analysées afin de vérifier qu’elles étaient toutes valides et vérifiées par une tierce partie, qu’elles suivaient les mêmes normes de référence et procédures, et qu’elles intégraient ou non le module D, de manière à garantir la robustesse scientifique de l’étude.

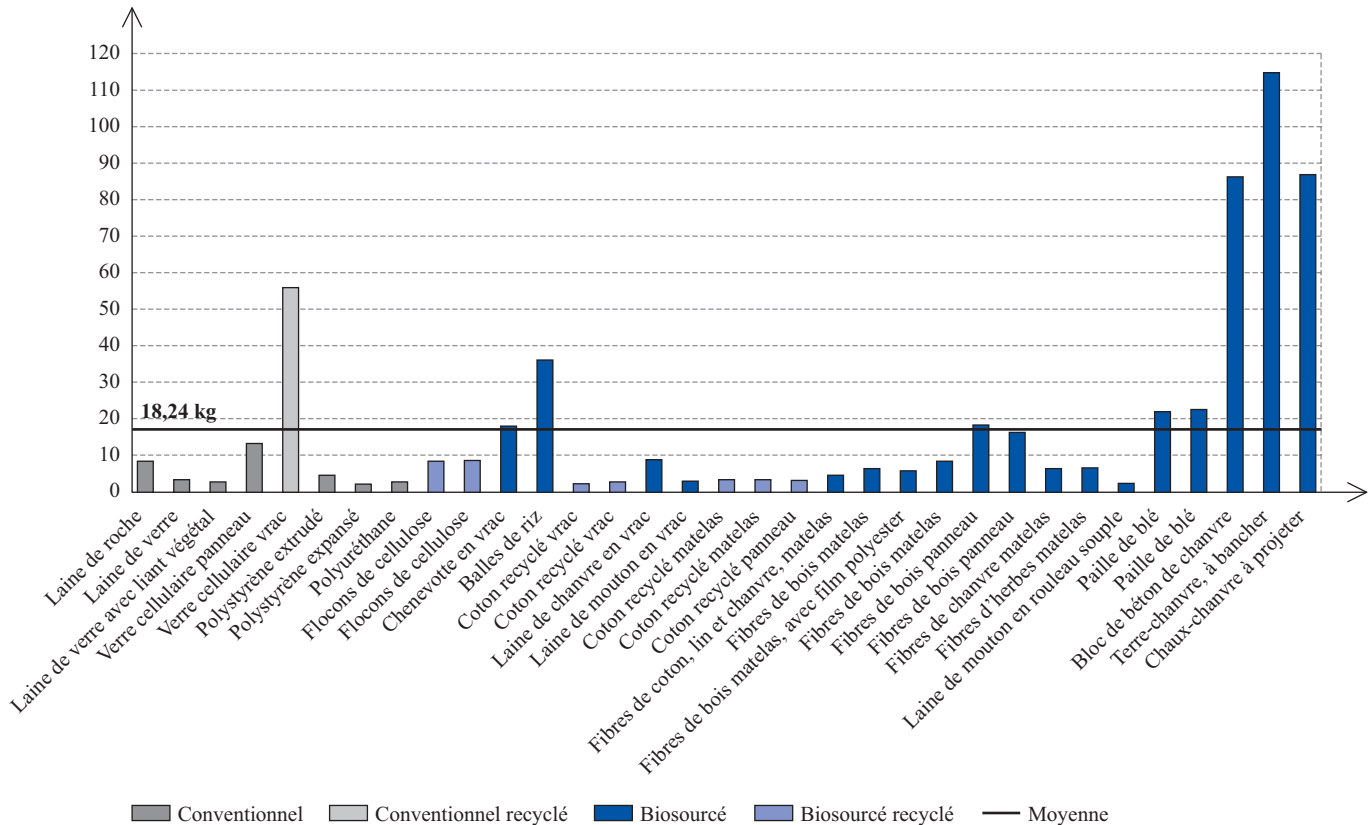
Cette première analyse a permis d’identifier, pour chaque isolant, l’unité fonctionnelle et le coefficient de conductivité thermique, et d’ainsi estimer la *quantité de matière mise en œuvre pour répondre à une exigence de résistance thermique équivalente à $R = 4 \text{ m}^2.K/W$* , critère permettant la comparaison entre les différents isolants biosourcés (fig. 17).

Cette quantité de matière doit être prise en considération dans les résultats présentés ci-après. En effet, la quantité de

matière mise en œuvre influence d’une part les performances thermiques et hygrométriques et d’autre part les impacts environnementaux, puisque ces derniers sont toujours calculés par kilogramme de matière produite. Elle impacte également la maniabilité de l’isolant lors de sa mise en œuvre sur chantier et lors de son démontage futur.

Ainsi, pour atteindre l’exigence de résistance thermique, la mise en œuvre d’un polyuréthane ($\rho = 31 \text{ kg/m}^3$ et $\lambda = 0,022 \text{ W/m.K}$) nécessite une épaisseur d’environ 9 cm et une quantité de matières équivalente à 2,79 kg par mètre carré, alors que celle de flocons de cellulose recyclée ($\rho = 50 \text{ kg/m}^3$ et $\lambda = 0,042 \text{ W/m.K}$) nécessite une épaisseur d’environ 17 cm et une quantité de matières équivalente à environ 8,5 kg par mètre carré.

Si l’ensemble des indicateurs présentés plus haut sont indispensables pour établir une évaluation rigoureuse et scientifique de l’impact environnemental global d’un matériau isolant, certains aspects relatifs à son cycle de vie doivent cependant être mis en évidence pour assurer la cohérence avec les objectifs européens et français en matière de transition énergétique, de neutralité carbone et de gestion durable et circulaire des ressources et des déchets dans le secteur de la construction.



▲ Fig. 17. Quantité de matières (en kg) utilisée, par nature d’isolant, pour répondre à l’exigence de résistance thermique $R = 4 \text{ m}^2.K/W$ (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base française Inies [69]).

Les indicateurs et aspects à mettre en lien avec la transition énergétique et la neutralité carbone des bâtiments sont la consommation d'énergie grise et les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie ainsi que la prise en compte du stockage du carbone biogénique.

Les indicateurs et aspects à mettre en lien avec la gestion durable et circulaire des ressources et des déchets sont la *disponibilité des ressources*, l'*apport de matières premières* (y compris l'incorporation de matières secondaires), les *types de déchets produits* (et leur traitement actuel) et le *potentiel de réutilisation ou de recyclage*.

C'est sur cette base de critères que 25 isolants biosourcés présents sur le marché français ont ainsi été analysés, puis comparés à 6 isolants conventionnels. Les résultats sont présentés ci-après.

6.2.1 | Consommation d'énergie grise

L'énergie grise d'un matériau est définie comme l'ensemble des ressources énergétiques consommées par chaque étape de transformation d'un produit de construction, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement du déchet. Elle est calculée en énergie primaire et est présentée en mégajoule par kilogramme [MJ/kg] de matière produite.

De manière normative, l'énergie grise est envisagée comme la somme des énergies renouvelables et non renouvelables utilisées sur l'ensemble du cycle de vie. Au sein de cette énergie sont distinguées l'énergie grise dite « processus » et l'énergie grise dite « matière ». L'énergie « processus » est l'énergie consommée par l'ensemble des processus de transformation (transport, fabrication, mise en œuvre, traitement en fin de vie) durant le cycle de vie du matériau. Il s'agit, pour ainsi dire, d'une énergie perdue ou d'une dette énergétique. L'énergie dite « matière » désigne la part d'énergie stockée dans la structure moléculaire du matériau. Cette énergie est potentiellement valorisable en fin de vie *via* des procédés de valorisation thermique, notamment l'incinération avec récupération d'énergie. Elle peut ainsi être considérée comme un stock énergétique mobilisé temporairement au cours du cycle de vie du matériau.

Dans le cadre d'une ACV, l'énergie grise est considérée comme un flux de ressources énergétiques primaires entrant et/ou sortant du système étudié, et susceptible de générer des impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie du matériau. Ce flux n'est pas toujours présenté de manière précise, notamment pour certaines étapes du cycle de vie, comme celle de mise en œuvre (A4 à A5) et/ou d'utilisation (B1 à B7).

Les données relatives à l'énergie grise des matériaux peuvent être récoltées dans les DEP, notamment les FDES. Ces déclarations détaillent la consommation d'énergie durant le cycle de vie et offrent des informations concernant l'utilisation d'énergie primaire renouvelable et non renouvelable, en faisant la distinction entre l'énergie utilisée dans les processus et les ressources énergétiques présentes dans les matières premières.

La figure 18 met en évidence la part significative d'énergie grise « matière » contenue dans les isolants organiques, qu'ils soient biosourcés ou synthétiques. Pour une majorité d'isolants, cette énergie est équivalente ou plus importante que l'énergie « processus ».

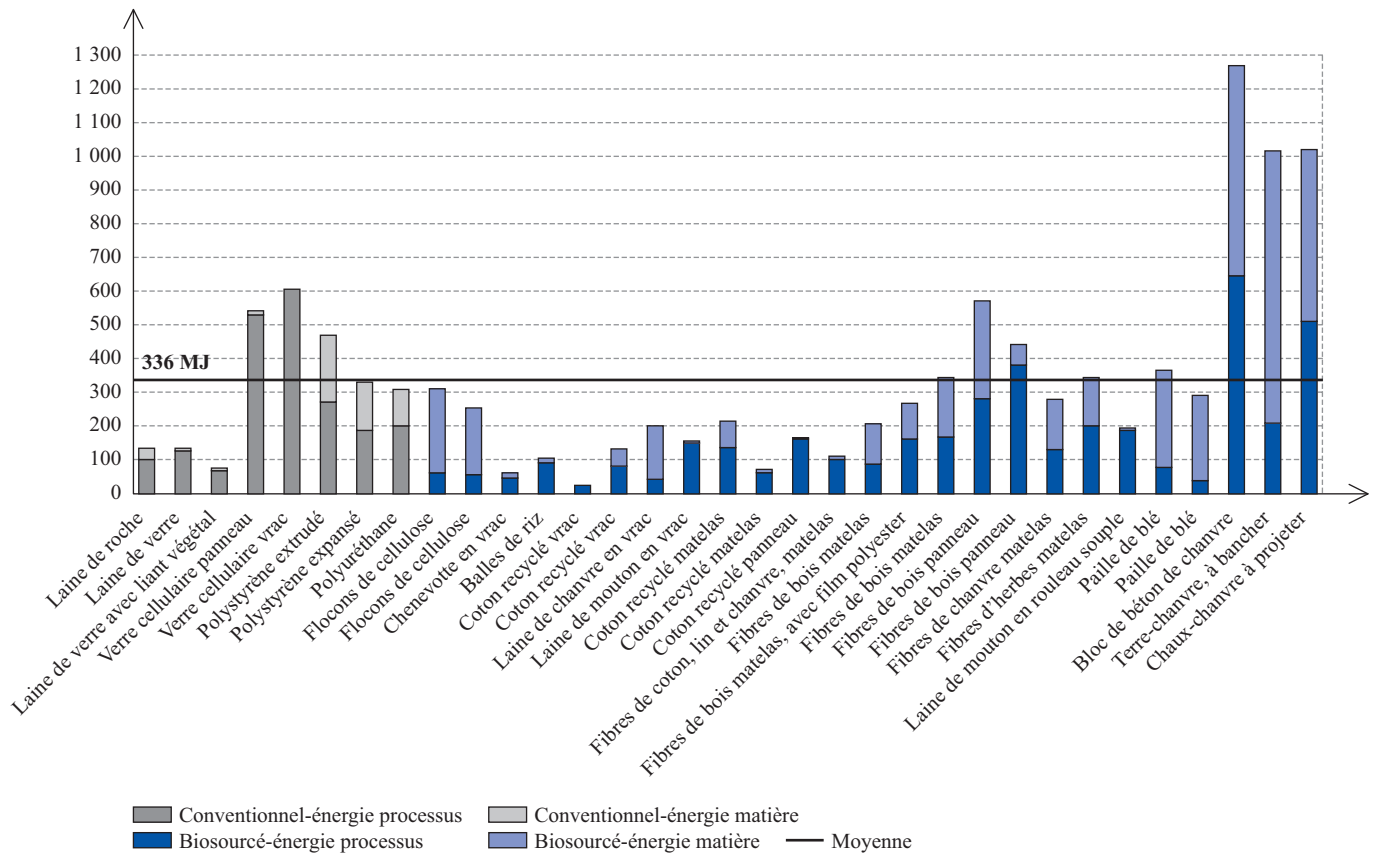
Il convient également de souligner la faible demande en énergie grise « processus » des isolants biosourcés recyclés et en vrac, notamment les flocons de cellulose recyclée, le coton recyclé, les granules et la laine de chanvre en vrac, ou encore la paille et les balles de riz. En revanche, les matelas et les panneaux de fibres végétales, comme les fibres de bois, nécessitent des processus de fabrication plus énergivores, notamment lorsqu'ils intègrent une montée en température ou un séchage. C'est également le cas pour certains isolants conventionnels, comme le verre cellulaire.

Enfin, la différence marquante entre le matériau « terre-chanvre » et les matériaux « chaux-chanvre » ou « béton de chanvre » en ce qui concerne l'énergie grise « processus » doit également être soulignée. Elle s'explique à la fois par la masse volumique de ces deux derniers matériaux et par la part importante de chaux et de ciment dans leur composition.

De manière générale, les réglementations relatives à la performance énergétique des bâtiments ne tiennent pas réellement compte de l'énergie cachée, c'est-à-dire celle mobilisée tout au long du cycle de vie des matériaux de construction – notamment les isolants thermiques – ainsi que des systèmes techniques intégrés au bâtiment pour garantir le confort et la sécurité des occupants [98]. Cette énergie cachée peut fortement alourdir le bilan énergétique global du bâtiment, principalement dans le cas de bâtiments énergétiquement performants [99]. Toutefois, dans une approche holistique de transition énergétique et de neutralité carbone, il serait pertinent d'intégrer cet aspect dans les réglementations relatives à la performance énergétique des bâtiments, et de promouvoir ainsi des bâtiments énergétiquement efficaces tant au niveau de la construction que de leur exploitation. Cette posture renforcerait également les pratiques de réemploi et de rénovation dans le secteur de la construction.

6.2.2 | Les émissions de gaz à effet de serre (GES) et l'indicateur « potentiel de réchauffement climatique »

Les émissions de GES qui sont générées durant le cycle de vie d'un matériau de construction – et plus spécifiquement d'un isolant thermique – ne peuvent plus être négligées. Ces émissions peuvent s'avérer importantes selon le type de transformation, de mise en œuvre ou de traitement en fin de vie, puisque les processus et les équipements utilisés pour la production, le transport, la mise en œuvre, l'entretien, le démontage et la gestion en fin de vie fonctionnent encore principalement avec des combustibles fossiles.



▲ Fig. 18. Consommation d'énergie grise (en MJ), par nature d'isolant, pour 1 m² d'isolation répondant à l'exigence de résistance thermique $R = 4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base française Inies [69]).

Ont été considérés l'énergie processus (renouvelable et non renouvelable) et l'énergie matière (renouvelable et non renouvelable) sur l'ensemble du cycle de vie.

Dans l'ACV, les émissions de GES produites tout au long du cycle de vie sont considérées comme un impact, désigné sous le terme de « potentiel de réchauffement climatique »⁽⁶⁾. Celui-ci est exprimé en kilogramme de CO₂ équivalent par kilogramme de matière produite.

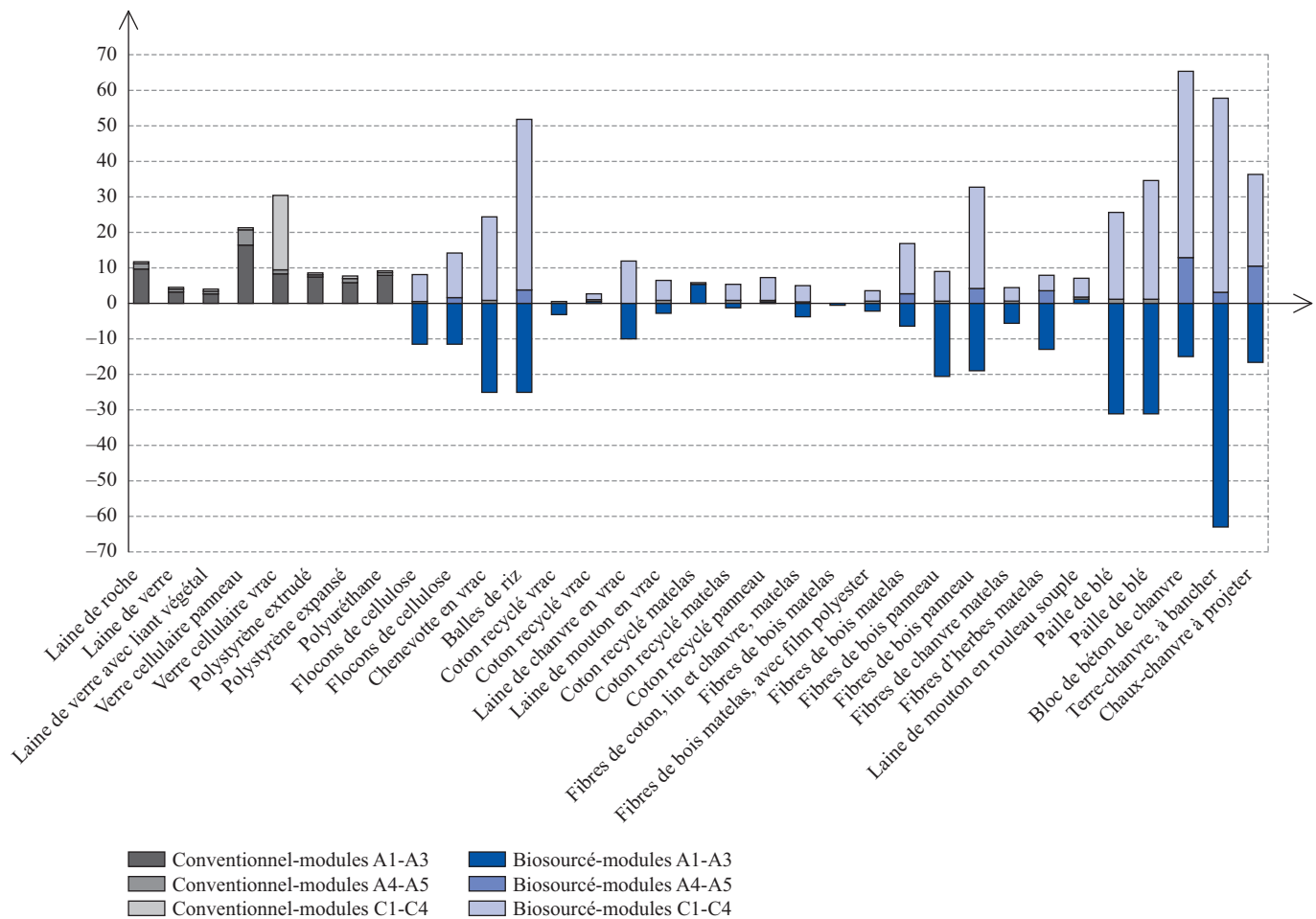
Il prend en compte à la fois le stockage de carbone biogénique par les matières organiques biosourcées durant leur croissance et leur utilisation, et les émissions liées à l'utilisation des combustibles fossiles. Sont également considérées les émissions de carbone biogénique et d'autres GES (comme le méthane) lorsque ces matières biosourcées, arrivées en fin de vie, sont valorisées thermiquement ou stockées en centre d'enfouissement technique, ainsi que les émissions liées à l'utilisation des sols.

La figure 19 met en évidence le bilan négatif des isolants biosourcés sur la phase de production, allant de 2 à 3 kg pour le coton recyclé en vrac ou en matelas, jusqu'à plus de 45 kg pour les balles de riz, et plus de 65 kg CO₂ éq. captés pour le

terre-chanvre, et ce par mètre carré d'isolation répondant à une résistance thermique R de $4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Ce bilan reste très favorable pour la phase de mise en œuvre. En revanche, le bilan de la fin de vie est relativement conséquent pour un grand nombre d'isolants biosourcés (chênevotte en vrac, balles de riz, fibres de bois, chaux-chanvre, terre-chanvre, etc.) puisque les scénarios de fin de vie proposés pour ceux-ci sont principalement l'enfouissement technique et/ou la valorisation thermique, deux traitements qui impliquent un relargage de GES dans l'atmosphère. Le cas de la paille est complexe, puisque les scénarios de fin de vie envisagent soit un compostage industriel, soit une réutilisation sous forme de paillage ou de litière animale. Dans les deux cas, une réémission de GES est constatée. D'où l'intérêt, à court terme, de développer en priorité des filières de réemploi afin d'éviter le relargage du carbone en le conservant dans les produits sur des temps plus longs, puis de mettre en place des filières de collecte des chutes et/ou des déchets pour les réintroduire dans les cycles de production et réduire ainsi le phénomène de réémission.

La figure 20 met cependant en évidence que le bilan global sur l'ensemble du cycle de vie est faible pour la plupart des isolants

(6) Global Warming Potential (GWP).



▲ Fig. 19. Émissions de GES (en kg CO₂ éq.), par nature d'isolant, pour 1 m² d'isolation répondant à l'exigence de résistance thermique $R = 4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base Inies [69]).

Les étapes considérées par le schéma sont l'étape de production, l'étape de mise en œuvre et l'étape de fin de vie.

biosourcés, voire négatif pour certains, comme la cellulose recyclée en vrac, le coton recyclé en vrac, certains isolants en fibres de bois, les fibres d'herbe et la paille. *A contrario*, et excepté pour les laines de verre, les isolants conventionnels ont un bilan supérieur à 5 kg CO₂ éq. par mètre carré d'isolation répondant à une résistance thermique R de 4 m².K/W. Ce seuil est parfois doublé, voire triplé.

Cette figure démontre ainsi l'intérêt d'exploiter des matériaux biosourcés dans le secteur de la construction pour leur capacité à stocker du carbone biogénique sur des temps longs, allant généralement de 30 à 60 ans, parfois 75 ans. Cette caractéristique répond aux exigences de la RE 2020 ainsi qu'aux exigences de « bâtiments à émissions nulles » et de « potentiel de réchauffement planétaire (PRP) tout au long du cycle de vie » de la nouvelle directive 2024/1275 du 24 avril 2024 [78].

Le carbone biogénique est le carbone contenu dans la biomasse d'origine végétale, agricole ou forestière, grâce au phénomène

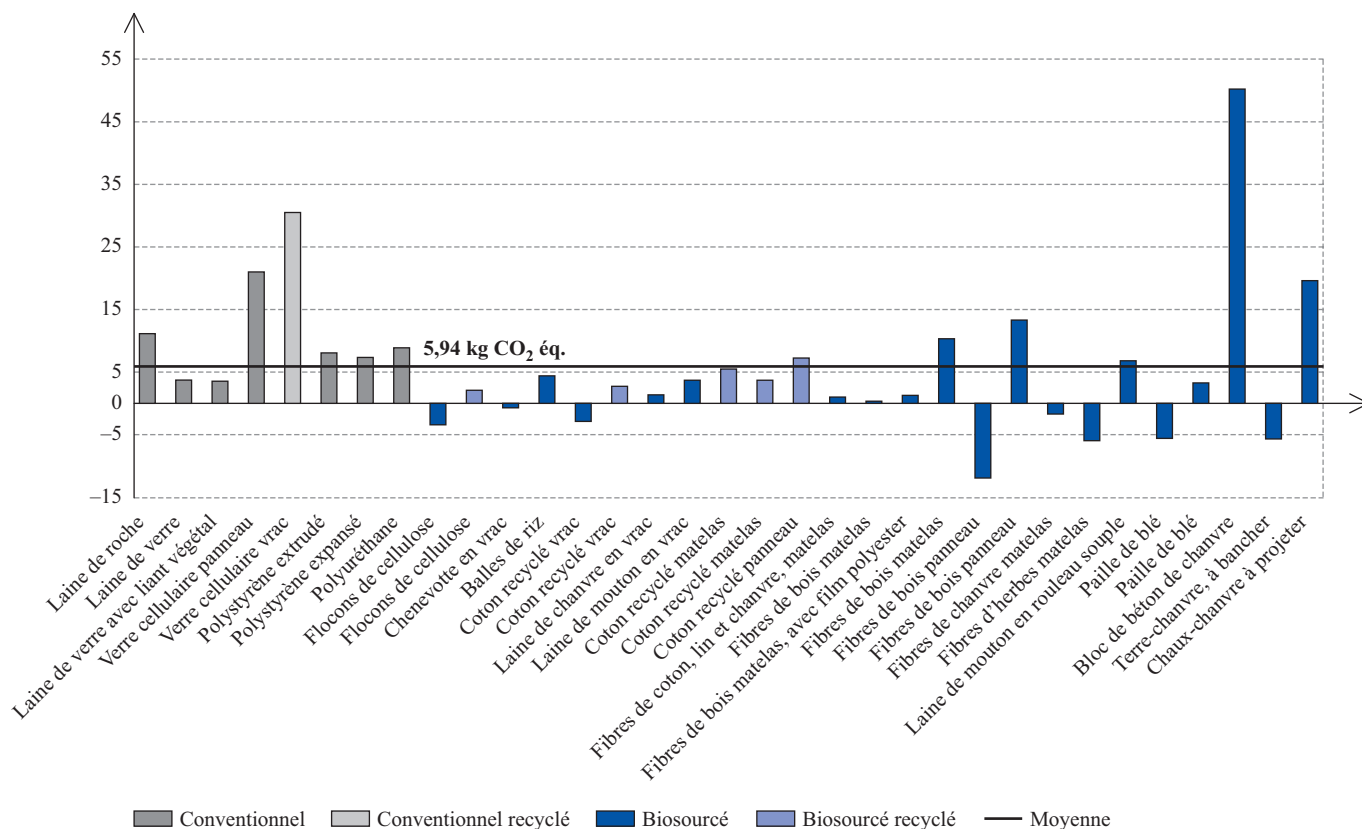
de photosynthèse qui permet aux végétaux d'absorber du CO₂. Le carbone biogénique peut être réémis lors de la combustion et/ou la dégradation de cette même biomasse.

À titre d'exemple :

- les isolants à base de coton recyclé de l'entreprise Métisse⁽⁷⁾ sont composés de 95 à 99 % de cellulose, elle-même composée en moyenne de 45 % de carbone. Ainsi, 1 kg d'isolant Métisse contient environ 0,305 kg de carbone biogénique, soit environ 1,12 kg de CO₂ ;
- les isolants en fibres d'herbe produits par l'entreprise Gramitherm⁽⁸⁾ sont composés 72 % d'herbes et de 20 % de jute

(7) Données reprises à la page 6 de la fiche de déclaration FDES « Panneau METISSE RT » réalisée par FRD-Codem et vérifiée par WeLOOP.

(8) Données reprises à la page 7 de la déclaration environnementale belge B-EPD « Gramitherm 100 » réalisée par le laboratoire PEPs (ULiège) et vérifiée par WeLOOP.



▲ Fig. 20. Émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie (en kg CO₂ éq.) par nature d'isolant conventionnel et biosourcé, pour 1 m² répondant à l'exigence de résistance thermique R = 4 m².K/W (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base française Inies [69]).

recyclée. Ainsi, 1 kg d'isolant Gramitherm contient 0,48 kg de carbone biogénique, soit environ 1,756 kg de CO₂ ;

- les isolants en paille, selon la fiche de déclaration environnementale et sanitaire de RFCP, sont composés de 98,78 % de paille de blé et 0,11 % de ficelle en polypropylène. Ainsi 1 kg d'isolant en paille contient 0,395 kg de carbone biogénique, soit environ 1,414 kg de CO₂.

L'absorption du CO₂ présent dans l'atmosphère par les végétaux, *via* le phénomène de photosynthèse, est une contribution apportée par la biomasse à l'atténuation du changement climatique, car elle permet de réduire ou limiter la teneur de ce polluant dans l'atmosphère. Ce rôle joué par la biomasse est réel à la seule condition que la ressource végétale utilisée est renouvelée et gérée durablement.

Ainsi, la figure 21 met en évidence un stockage de carbone biogénique relativement important (> 5 kg C) pour une série d'isolants biosourcés, dont la chènevotte, balle de riz, matelas et panneau de fibres de bois, matelas de fibres d'herbe, paille de blé et béton de chanvre, et ce par mètre carré d'isolation répondant à une résistance thermique R de 4 m².K/W.

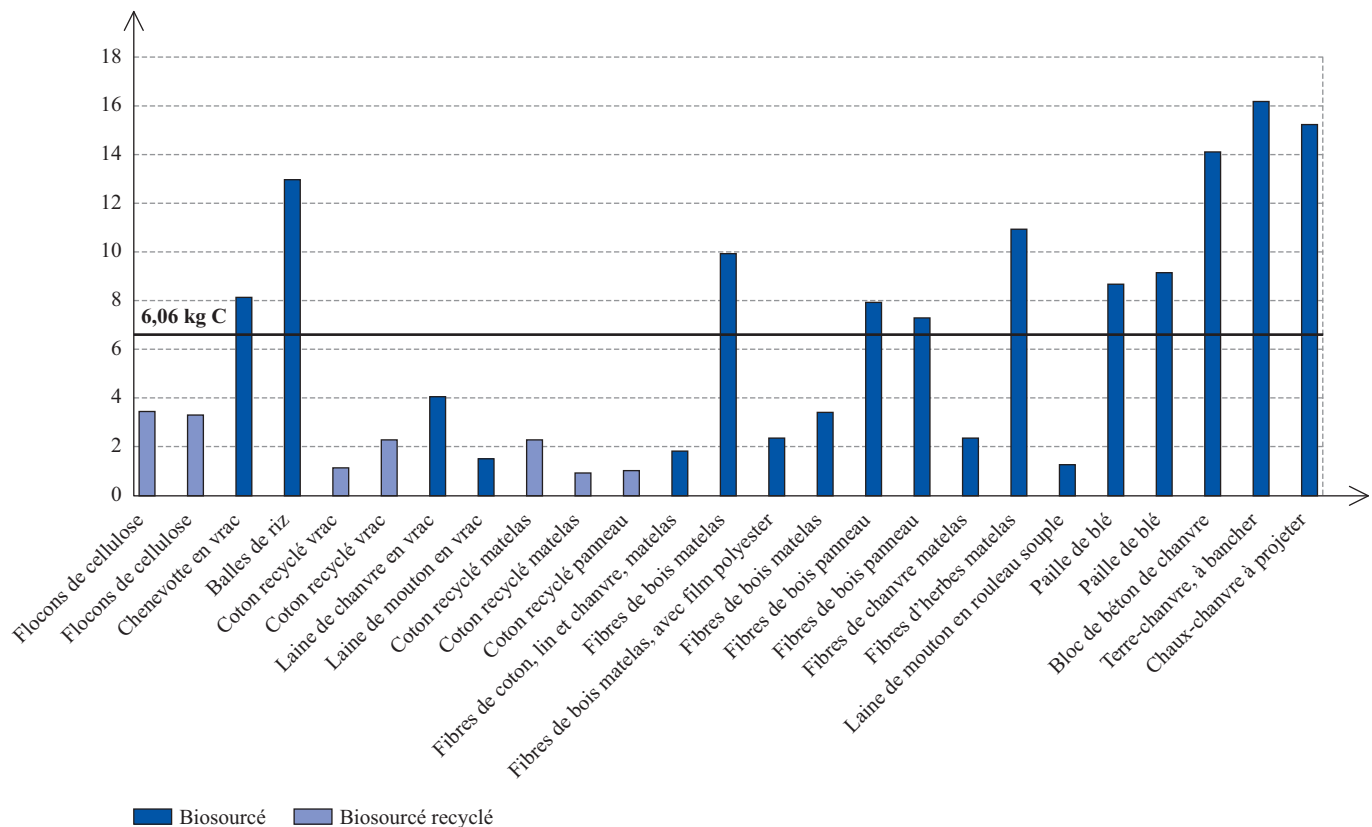
En revanche, excepté les flocons de cellulose recyclée, les isolants recyclés, tels que les isolants à base de coton recyclé,

présentent une capacité de stockage moins grande, se situant autour de 1 kg de carbone biogénique.

6.2.3 | Disponibilité des ressources

La première étape du cycle de vie concernant l'approvisionnement en matières premières met en évidence le stock disponible d'une ressource. Pour les ressources issues de la biomasse, considérées comme renouvelables, la disponibilité du stock dépend du temps de renouvellement entre chaque pousse naturelle (herbe, roseau, feuillus et résineux) ou chaque récolte et coupe (chanvre, lin, céréales, liège, etc.). Ces temps de renouvellement sont variables d'une espèce végétale à l'autre, allant de quelques jours pour l'herbe à plusieurs dizaines d'années pour les arbres, en passant par quelques mois de culture pour le chanvre, le lin, les céréales ou le riz, et par une dizaine d'années pour le liège.

La disponibilité d'une ressource non renouvelable informe de l'état de son stock dans l'écosystème naturel terrestre tout en indiquant si l'exploitation régulière de la ressource s'inscrit dans une gestion raisonnée et soutenable du gisement existant sur le long terme. Dans l'ACV, l'épuisement des ressources naturelles non issues de la biomasse végétale ou animale et



▲ Fig. 21. Stockage du carbone biogénique (kg C) par nature d'isolant biosourcé, pour 1 m² répondant à l'exigence de résistance thermique $R = 4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base française Inies [69]).

non combustible est caractérisé par l'indicateur « Épuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux ». Cet indicateur environnemental est basé sur la comparaison entre la « rareté » d'une ressource non renouvelable et celle de l'antimoine Sb qui, par convention, a une valeur de 1. Plus l'indice de rareté est grand, plus le stock de la ressource est limité et son utilisation problématique du point de vue de la gestion durable des ressources.

La figure 22 présente les résultats de cet indicateur, en se concentrant uniquement sur la phase de production, à savoir les modules A1 (apport de matières premières), A2 (transport) et A3 (processus de fabrication). Elle met en évidence des indices relativement élevés pour les isolants conventionnels par rapport aux isolants biosourcés, excepté pour :

- la laine de roche, produite à partir de co-produits de l'industrie sidérurgique (laitier) et de roches volcaniques présentes en très grande quantité ;
- le polyuréthane, nécessitant très peu de matières pour atteindre les performances souhaitées ;
- le verre cellulaire en vrac, produit à partir de 98 % de déchets de verre.

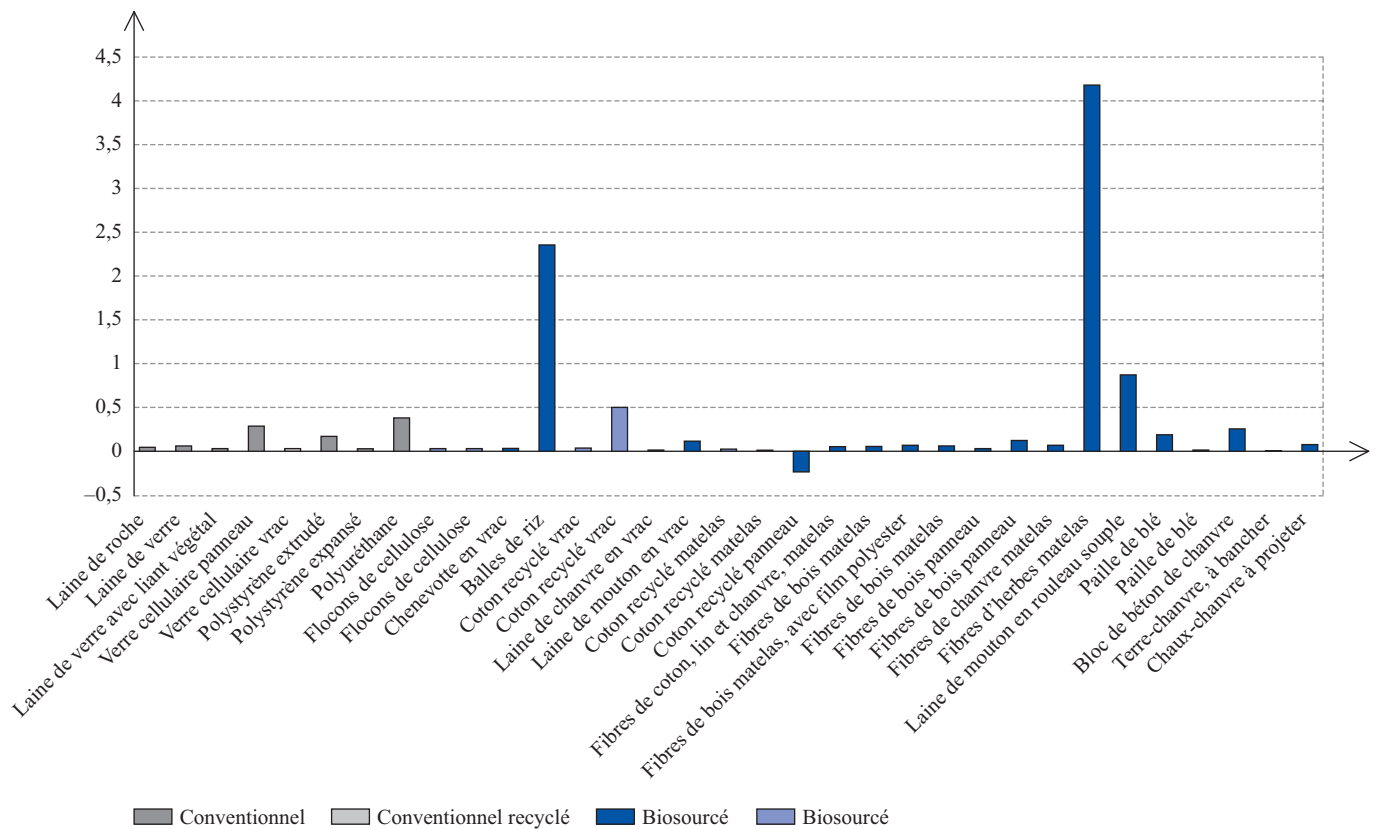
Les isolants biosourcés présentent de manière générale des indices proches de zéro pour les matériaux recyclés en vrac ou

entre 0 et 0,000025 pour la plupart des matériaux issus de la biomasse, sous forme de vrac ou de matelas, et ce, grâce principalement à la valorisation de sous-produits et co-produits. Les matériaux biosourcés sous forme de panneaux ont des bilans plus importants, conséquence de l'intégration d'un pourcentage plus élevé de fibres synthétiques. En outre, la différence de bilan entre le béton de chanvre produit à l'aide de ciment et le terre-chanvre ou le chaux-chanvre met également en évidence l'intérêt d'associer des fibres végétales à d'autres matériaux géosourcés naturels, tels que la terre crue.

6.2.4 | Eau virtuelle

Un dernier aspect repris dans cette analyse est la consommation d'eau nécessitée par le cycle de vie des matériaux isolants. En effet, bien que les bâtiments, lors de leur exploitation, ne sont responsables que de 12 % de la consommation mondiale en eau, ils peuvent représenter indirectement une part beaucoup plus importante de la demande totale en eau, du fait de la fabrication et de la mise en œuvre des matériaux de construction [100].

Cette consommation d'eau relève de la notion d'« eau virtuelle » [101], concept similaire à celui de l'énergie grise. Un



▲ Fig. 23. Utilisation nette d'eau douce (en m³) par nature d'isolant, pour 1 m² d'isolant à l'exigence de résistance thermique $R = 4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base Inies [69]).
Les données reprises ne concernent que la phase de production (A1 à A3).

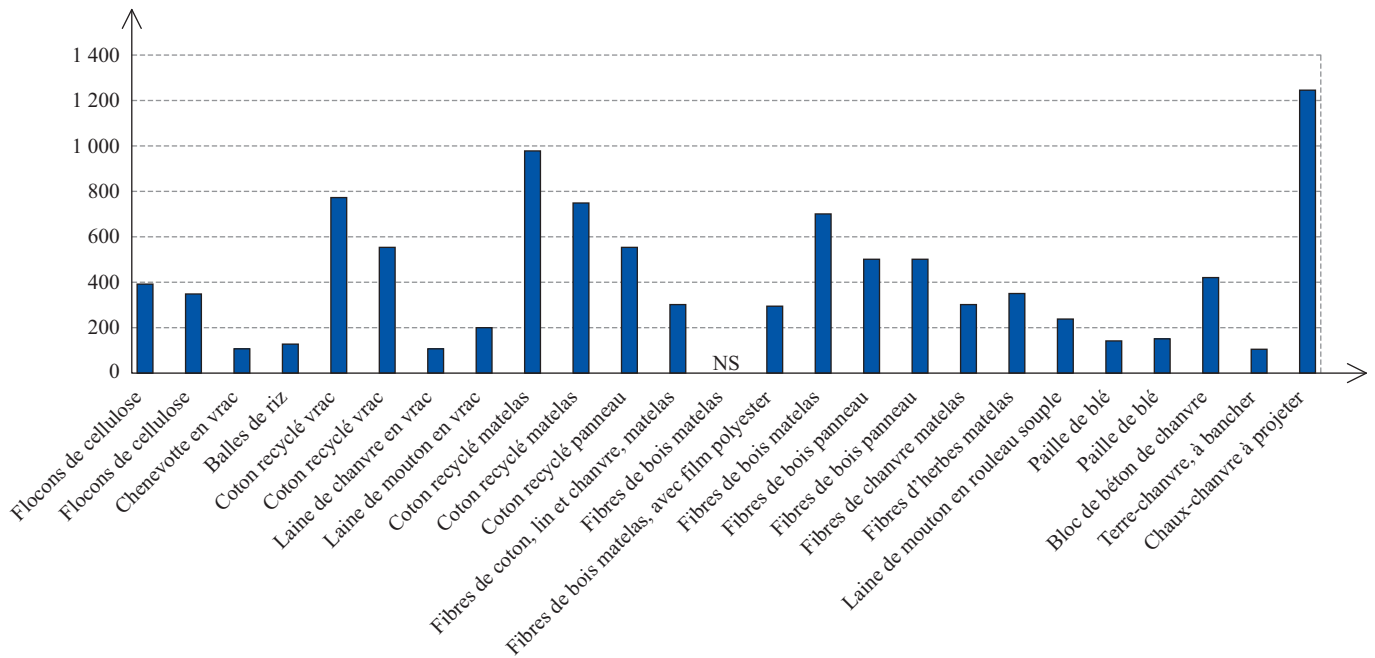
En revanche, une fois sortis d'usine, la plupart des isolants parcourent une distance maximale de 1 000 km, principalement en camion de 16 à 32 tonnes, soit directement vers le site du chantier, soit vers un revendeur de matériaux (fig. 24).

La figure 25 montre que la moitié des fabricants, et notamment l'ensemble des fabricants d'isolants conventionnels étudiés, ne spécifient pas l'impact CO_2 de la phase A2 relative à l'étape de production, alors que c'est généralement cette étape de transport qui est la plus significative en termes d'émission de CO_2 . Le transport vers le chantier (phase A4) présente également un impact conséquent, principalement pour les matériaux présentant une masse volumique importante, tels que le verre cellulaire pour les isolants conventionnels, et le chanvre, la paille, la fibre de bois, le chaux-chanvre et le terre-chanvre pour les isolants biosourcés. Enfin, le transport relatif à la fin de vie (phase C2) vers les filières de traitement peut également avoir un impact conséquent, notamment pour les fibres d'herbe, les fibres de chanvre, les fibres mélangées ainsi que le verre cellulaire.

6.3 Analyse comparative de solutions biosourcées en isolation par l'intérieur : l'outil *Totem*

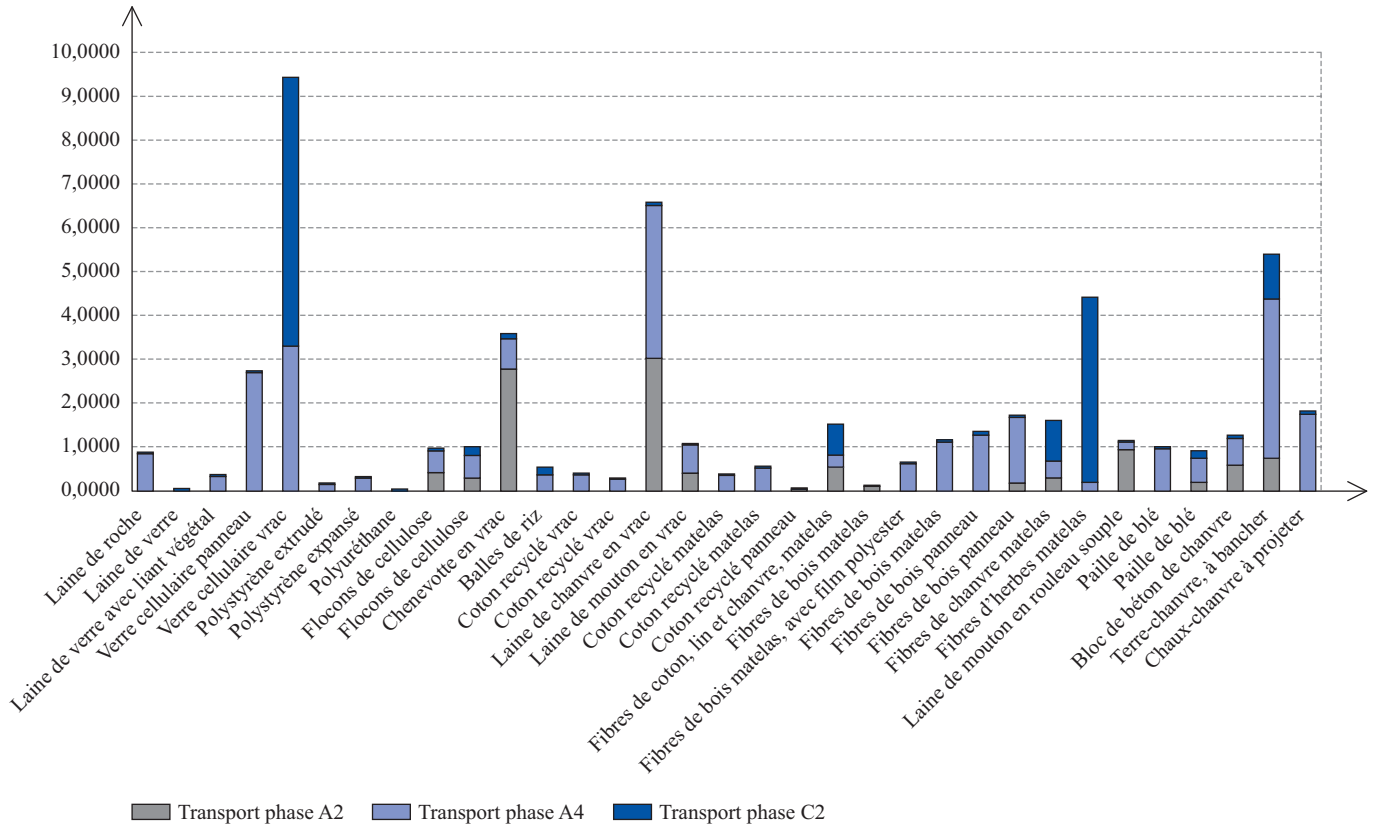
L'étude comparative réalisée à partir des fiches environnementales FDES n'a pas permis d'intégrer certains matériaux biosourcés, tels que les matelas et panneaux semi-rigides en lin ou le liège sous forme de granules et de panneaux, faute de déclaration environnementale disponible en France. Elle n'a pas non plus permis d'évaluer l'impact de matériaux de réemploi, par manque de données environnementales. L'étude comparative s'est uniquement concentrée sur les matériaux isolants, sans prendre en considération la performance de la paroi existante à isoler. Or, le bâti ancien, tant en France qu'en Belgique et plus généralement en Europe, présente des spécificités constructives qui doivent être prises en compte lors des rénovations énergétiques.

Pour cette raison, nous avons réalisé une étude complémentaire permettant de comparer plusieurs solutions d'isolation par l'intérieur (ITI) intégrant divers isolants biosourcés. Ces configurations ont été évaluées entre elles, puis confrontées à une solution d'isolation par l'extérieur (ITE) la plus



▲ Fig. 24. Distance parcourue (en km) entre le site de production et le chantier, suivant le scénario envisagé par le producteur (source : S. Trachte, sur la base des déclarations environnementales FDES de la base française Inies [69]).

Les données reprises ne concernent que la phase de transport A4.



▲ Fig. 25. Potentiel de réchauffement climatique en kg CO₂ éq. des différentes phases de transport (A2, A4 et C2), par nature d'isolant, pour 1 m² d'isolation à l'exigence de résistance thermique R = 4 m².K/W (source : S. Trachte).

couramment mise en œuvre en rénovation. Enfin, les solutions d'isolation biosourcée ont été, de manière théorique, évaluées et comparées suivant différents statuts attribués aux matériaux, en construction neuve et en réemploi, via l'outil *Totem* (fig. 26).

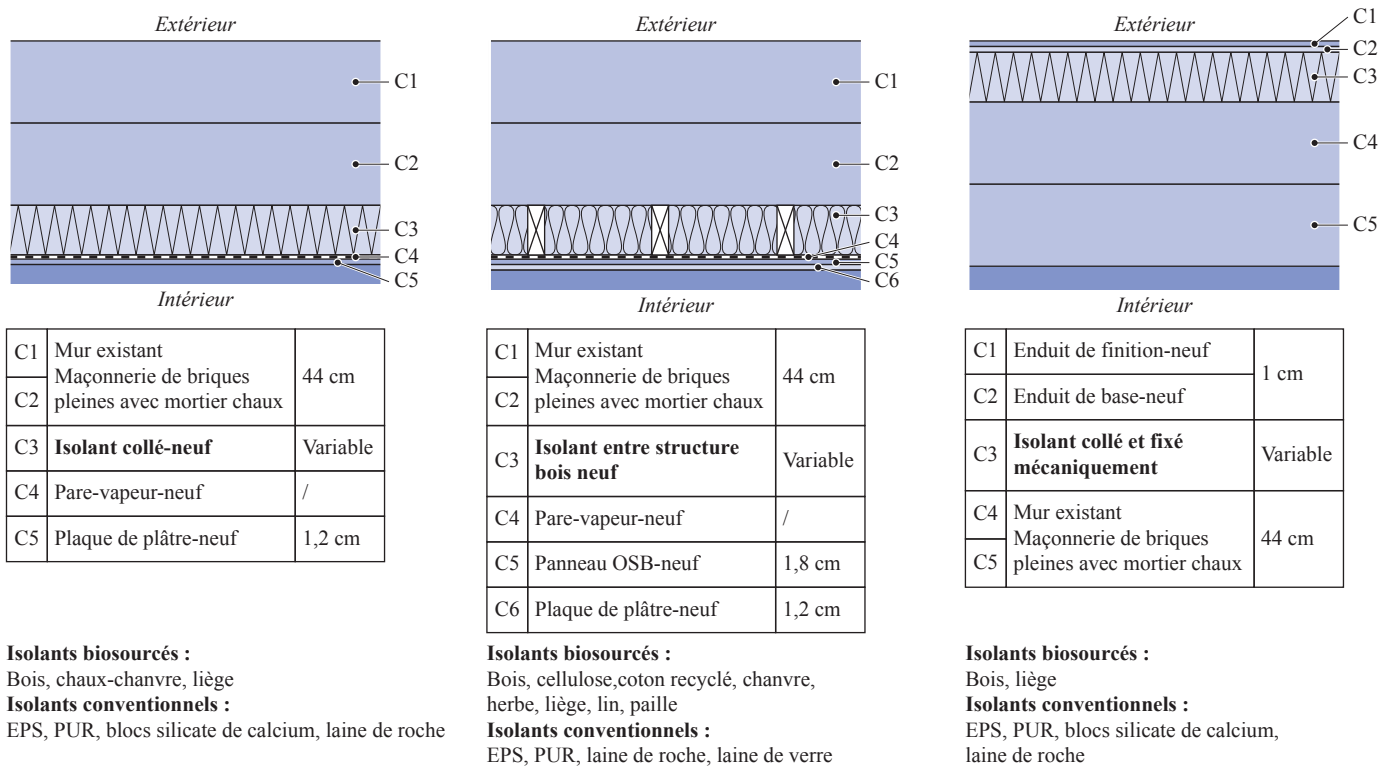
REMARQUE

Totem⁽¹⁰⁾ est un outil développé par les trois administrations régionales belges. Il permet d'évaluer les impacts environnementaux des matériaux de construction et des bâtiments en s'appuyant sur les normes européennes en vigueur. Conçu pour analyser l'impact environnemental de parois ou d'ouvrages sur l'ensemble de leur cycle de vie, *Totem* aide également à optimiser les choix architecturaux en comparant différentes variantes de conception (par exemple le système constructif, la forme du bâtiment, ou encore des scénarios de rénovation ou de démolition-reconstruction).

Toutes les informations relatives à la méthodologie, aux bases de données, aux scénarios de fin de vie ainsi qu'aux durées de vie sont accessibles via l'onglet « Documentation » disponible sur la page d'accueil de l'outil [105].

Les spécificités de l'outil *Totem* sont les suivantes :

- depuis 2021, l'outil intègre l'ensemble des indicateurs environnementaux repris dans la norme NF EN 15804+A2 [88], en les regroupant en 12 catégories d'impacts ;
- afin de faciliter la comparaison de résultats, l'outil propose un score unique, en appliquant la méthode de pondération PEF⁽¹¹⁾, exprimée en milli-point (mPt). Il offre également les résultats détaillés par indicateur et par étapes de cycle de vie, tout en précisant l'impact environnemental de la demande en chauffage ;
- la base de données de l'outil reprend à la fois des données génériques issues de la base de données suisse Ecoinvent, mais adaptées au contexte belge, et des données issues des déclarations de producteurs ;
- la bibliothèque de l'outil permet de travailler à l'échelle « Composant » (matériau avec son assemblage) et à l'échelle « Parois types », que l'utilisateur peut mobiliser et adapter pour composer son projet. L'utilisateur peut également créer sa propre bibliothèque de parois à partir de la bibliothèque « Matériaux » ;
- l'outil propose plusieurs statuts pour modéliser les matériaux et les parois : existant, démoli, neuf, réemployé *in situ* et réemployé *ex situ*. Cette option permet de modéliser différents types de projets, de la construction neuve à l'extension, en passant par la rénovation et la démolition-reconstruction.



▲ Fig. 26. Scénarios d'isolation modélisés dans l'outil d'évaluation environnementale *Totem* (source : S. Trachte).

Chaque couche a été modélisée de façon distincte : la paroi existante (en deux épaisseurs de briques), les matériaux additionnels et l'isolant thermique.

(10) Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials (outil d'optimisation de l'impact environnemental global des matériaux).

(11) Product Environmental Footprint (empreinte environnementale des produits).

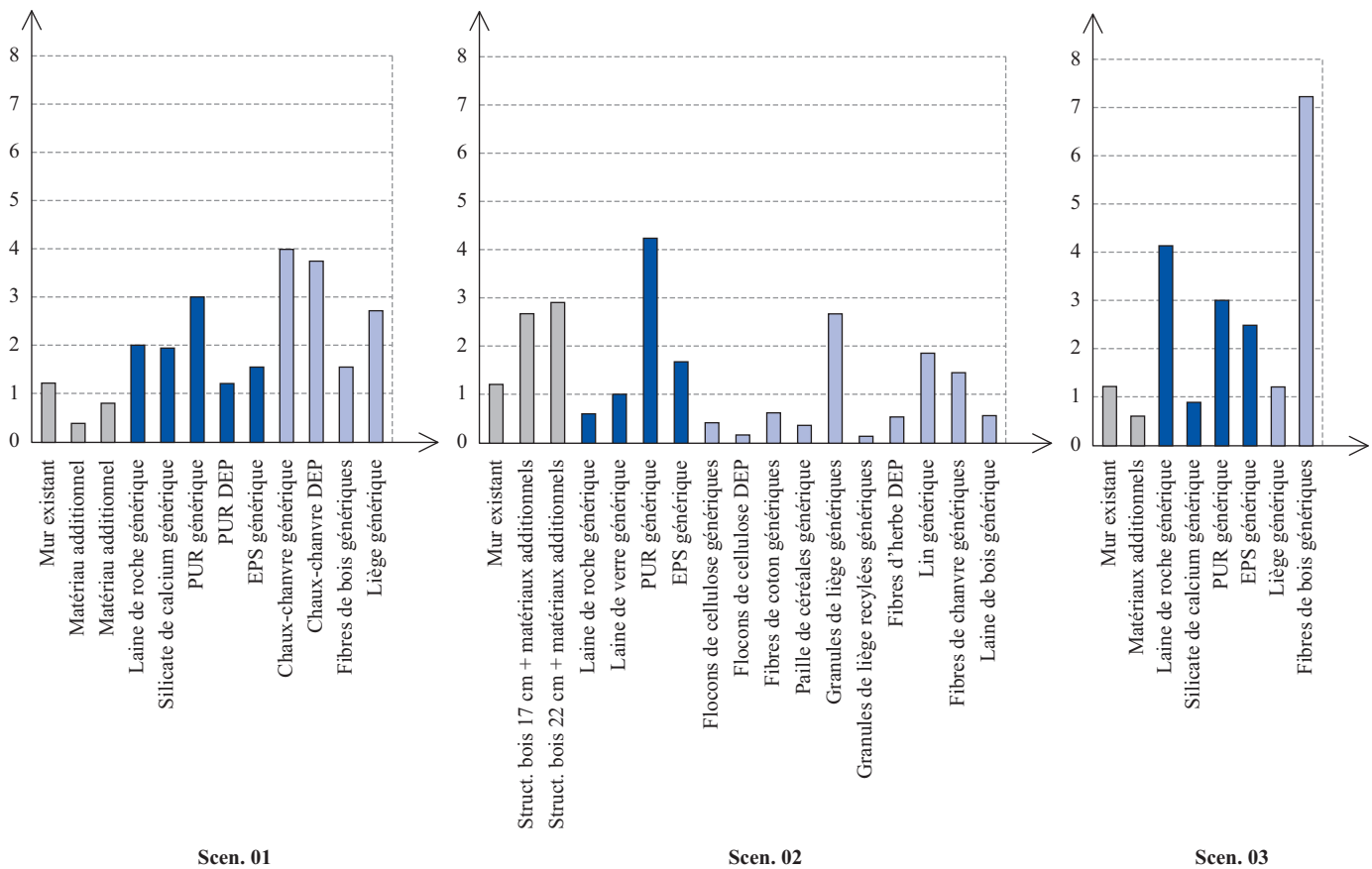
L'analyse environnementale, bien qu'ayant été réalisée sur l'ensemble des indicateurs environnementaux, ne reprend que les résultats des indicateurs relatifs au réchauffement climatique, et à la consommation des ressources abiotiques – combustibles fossiles et minéraux – pour rester en concordance avec l'analyse réalisée à partir des déclarations environnementales FDES.

Les résultats sont présentés dans la figure 27, sur la base d'un mètre carré de paroi isolée répondant à l'exigence d'un coefficient de déperdition thermique U de $0,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ et d'une durée de vie de 60 ans. Pour chaque scénario, les impacts environnementaux de la paroi existante (en gris clair), des matériaux additionnels (en gris foncé) et des isolants sous différentes natures (isolants conventionnels en bleu et isolants biosourcés en vert) sont présentés de manière distincte.

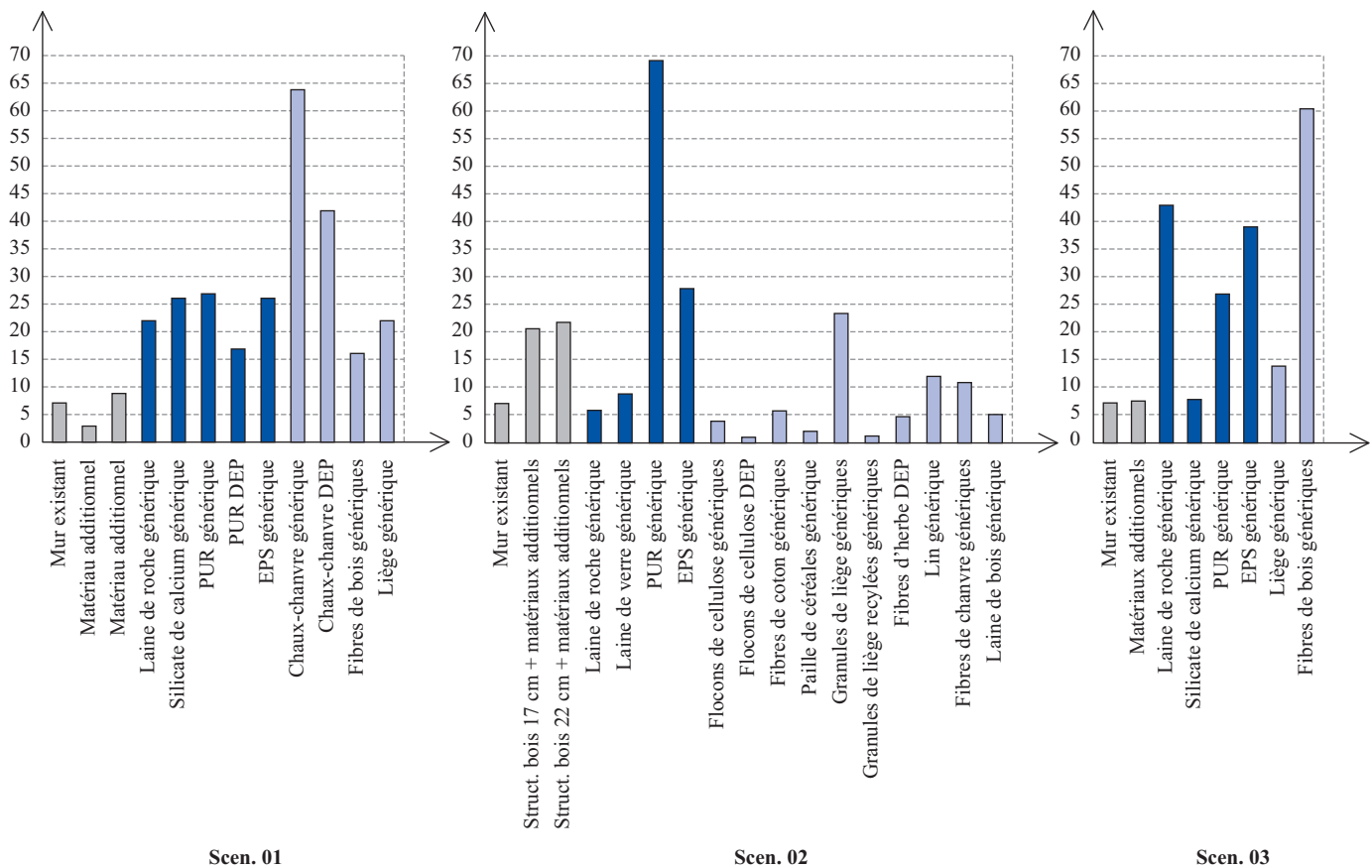
La méthode européenne PEF permet d'agrèger l'ensemble des résultats relatifs aux 17 indicateurs environnementaux en un score global, en mPt, en pondérant chacun d'entre eux. Le score global repris pour chaque scénario dans la figure 27 met

en évidence l'impact plus faible des matériaux isolants sous forme de vrac ou de matelas dans le cas du scénario 2, mais un impact plus important pour les matériaux additionnels. Les scénarios 1 et 3, utilisant des isolants rigides collés ou à la fois collés et fixés mécaniquement, montrent un impact plus significatif pour ceux-ci, même dans les solutions biosourcées, en particulier le chaux-chanvre et le liège. Cela s'explique notamment par leur masse volumique plus importante que celle des matériaux conventionnels, nécessitant une plus grande quantité de matière pour une même performance d'isolation et entraînant, par conséquent, un impact environnemental plus important.

Ces constatations peuvent également être formulées concernant l'impact sur le réchauffement climatique, comme le montre la figure 28. Les isolants ayant l'impact le plus élevé sont le chaux-chanvre et le liège. Ceci peut s'expliquer par la présence de chaux dans le premier matériau et par un processus de fabrication assez énergivore et la présence de fixations mécaniques pour le second.



▲ Fig. 27. Évaluation de trois scénarios d'isolation. Score environnemental global, en mPt, pour 1 m^2 de paroi isolée, répondant à l'exigence $U = 0,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, sur la base d'une modélisation sur l'outil Totem (source : S. Trachte).



▲ Fig. 28. Évaluation de trois scénarios d'isolation. Réchauffement climatique sur l'ensemble du cycle de vie, en kg CO₂ eq., pour 1 m² de paroi isolée, répondant à l'exigence $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, sur la base d'une modélisation sur l'outil *Totem* (source : S. Trachte).

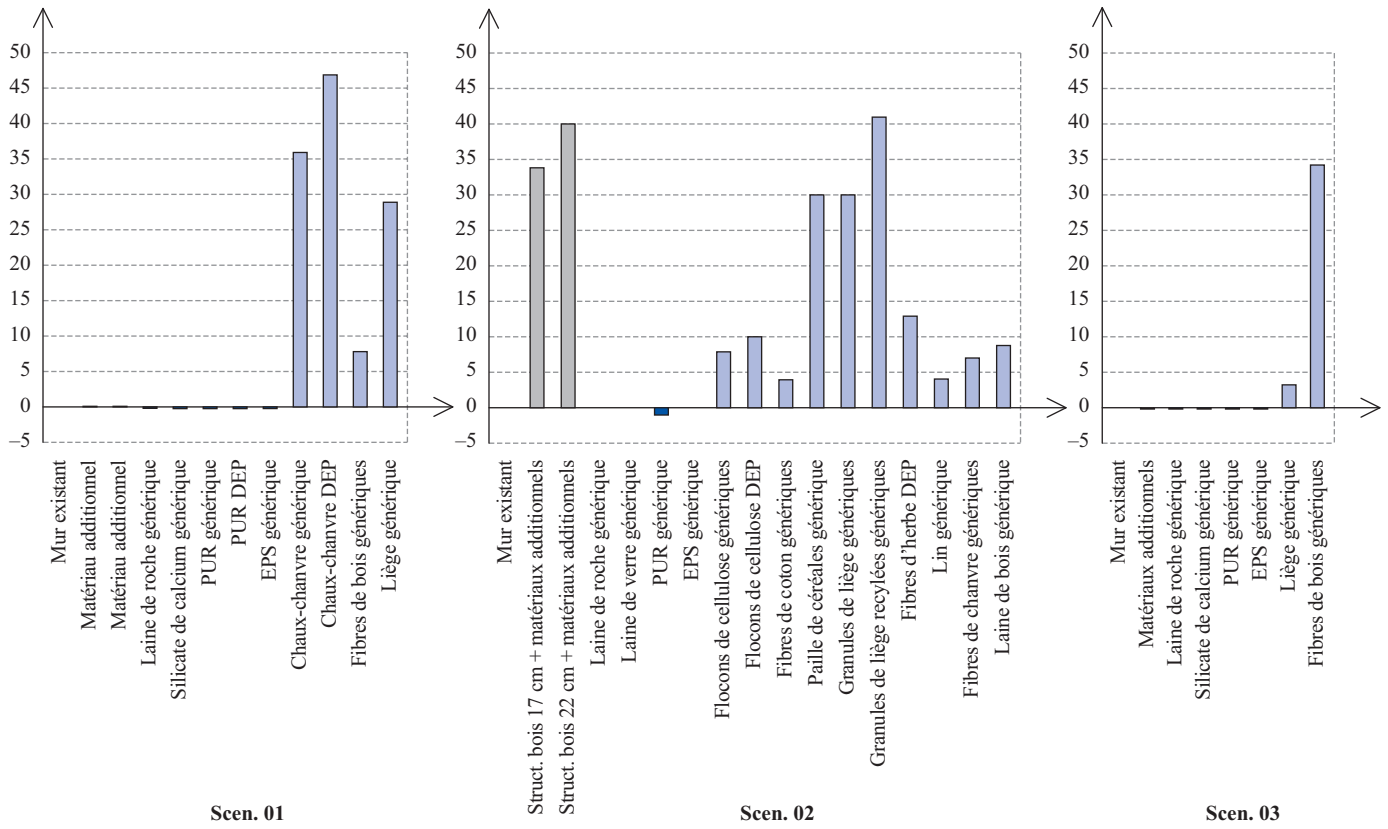
En revanche, concernant le stockage du carbone biogénique, les trois scénarios de la figure 29 montrent un impact positif très conséquent, avec un stockage dépassant largement celui des isolants traditionnels et variant de 4 kg CO₂ pour le lin, le bois ou les fibres de coton recyclé à 30 kg CO₂ et plus pour le chaix-chanvre, le liège en panneau et en granules, ainsi que les fibres d'herbe.

Les résultats relatifs à l'épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles (fig. 30) – sont assez similaires à ceux du score environnemental global et du réchauffement climatique. Les isolants modélisés dans le scénario 2 présentent un impact généralement plus faible que les isolants traditionnels, alors que, dans les scénarios 1 et 3, les résultats sont plus mitigés, avec un impact souvent supérieur par rapport aux isolants traditionnels. Il en est de même pour les résultats concernant l'épuisement des ressources abiotiques – matières minérales (fig. 31).

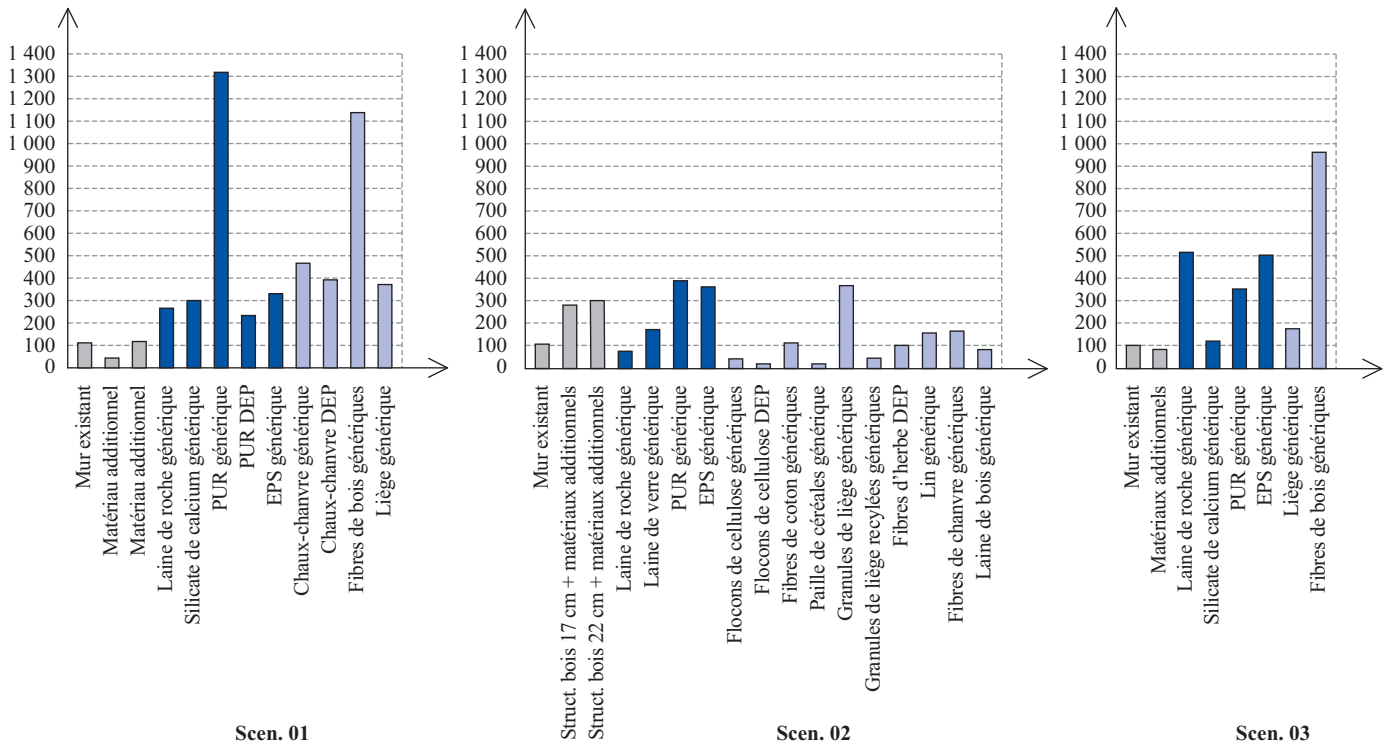
Si cette seconde étude présente des résultats plus hétérogènes concernant les isolants biosourcés, pour une série de matériaux,

l'outil *Totem* n'offre cependant que des données génériques basées sur des scénarios de cycle de vie construits à partir de la littérature et non du cycle de vie réel de ceux-ci. Une étude de sensibilité réalisée par nos soins a permis de démontrer que les données génériques sont souvent plus défavorables que les données issues des déclarations environnementales des fabricants. Il conviendrait également d'analyser le scénario considéré pour l'apport des matières premières (module A1 de l'ACV) en identifiant si les matières premières rentrant dans le cycle de production ont été considérées comme des ressources à part entière (tous les impacts de la phase de culture sont pris en compte), des co-produits (un pourcentage des impacts de la phase de culture est pris en compte) ou des sous-produits (aucun impact n'est pris en compte). Ceci pourrait aussi expliquer certains résultats plus négatifs.

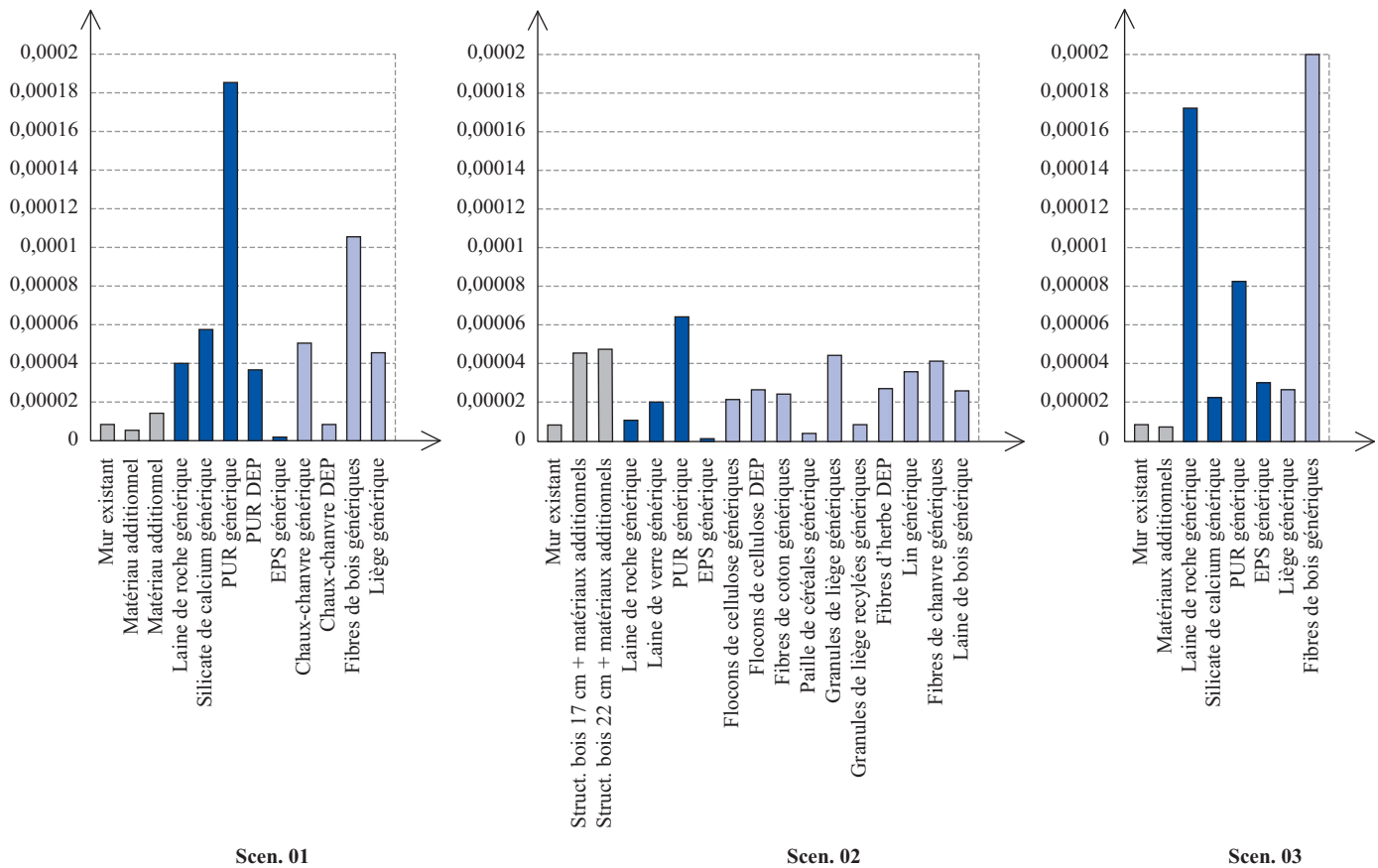
Le scénario 2 a aussi fait l'objet d'une alternative, mettant en évidence l'intérêt des matériaux de réemploi *ex situ* par rapport aux matériaux neufs en matière de réduction d'impact environnemental. Pour les matériaux neufs, l'outil *Totem* considère



▲ Fig. 29. Évaluation de trois scénarios d'isolation. Stockage du carbone sur les modules A1 à A3, en kg CO₂ éq., pour 1 m² de paroi isolée, répondant à l'exigence U = 0,24 W/m²K, sur la base d'une modélisation sur l'outil Totem (source : S. Trachte).



▲ Fig. 30. Évaluation de trois scénarios d'isolation. Épuisement des ressources abiotiques, combustibles fossiles en MJ (valeur calorique nette), pour 1 m² de paroi isolée, répondant à l'exigence U = 0,24 W/m²K, sur la base d'une modélisation sur l'outil Totem (source : S. Trachte).



▲ Fig. 31. Évaluation de trois scénarios d'isolation. Épuisement des ressources abiotiques, matières minérales en kg Sb éq., pour 1 m² de paroi isolée, répondant à l'exigence $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, sur la base d'une modélisation sur l'outil *Totem* (source : S. Trachte).

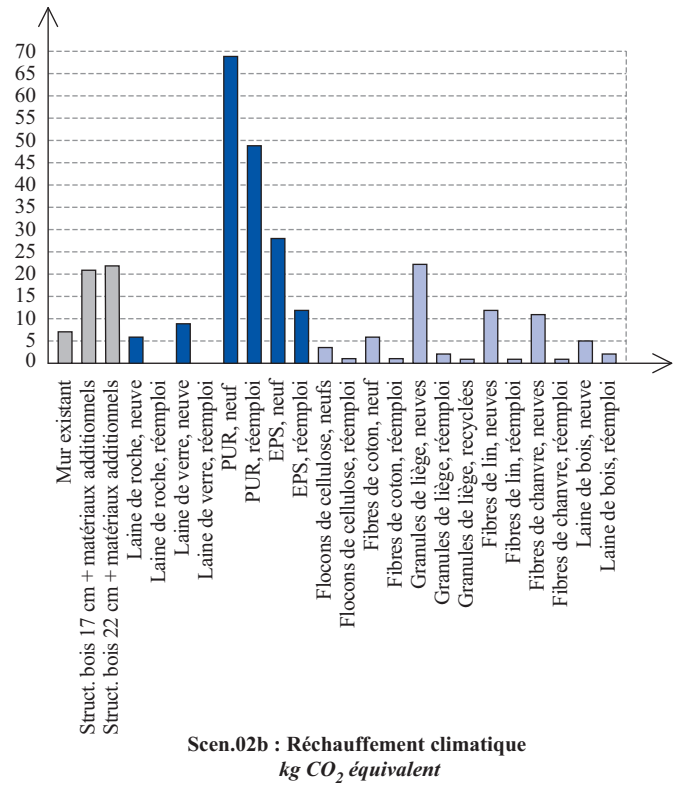
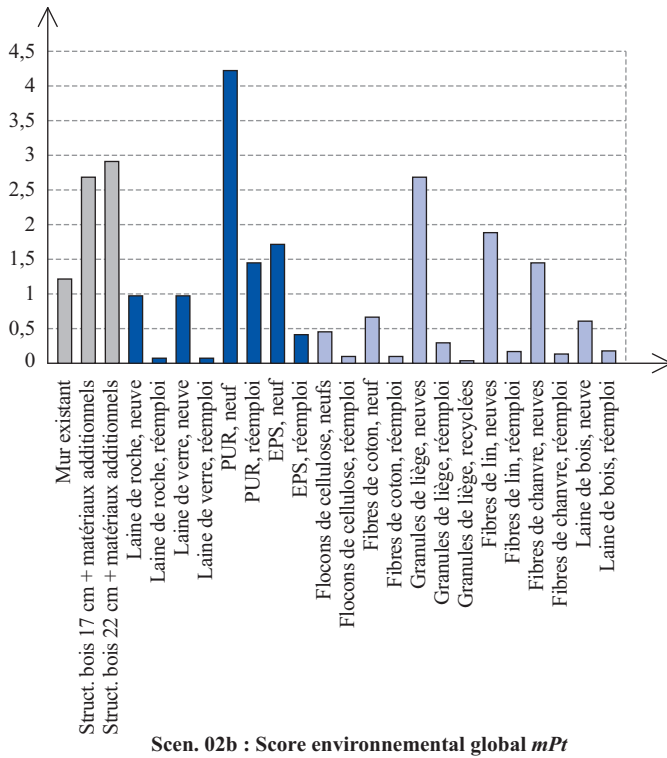
l'ensemble des modules A à C, ainsi que le module D. Pour les matériaux de réemploi *ex situ*, il considère uniquement les modules A4, A5, B, C et D. Les résultats de l'analyse comparative sont présentés dans la figure 32 et la figure 33.

Pour les quatre indicateurs analysés, les constatations sont identiques : les matériaux de réemploi ont un impact beaucoup plus faible, pratiquement dix fois inférieur par rapport à celui des matériaux neufs. Si cette dernière analyse est purement théorique, par manque à la fois de filières existantes et de réelles pratiques de réemploi dans le secteur de la construction, elle a le mérite de mettre en évidence la trajectoire à suivre dans les prochaines années, à savoir, en premier lieu, favoriser dès que possible les matériaux de réemploi et, en second lieu, favoriser l'usage de matériaux biosourcés à faible impact environnemental.

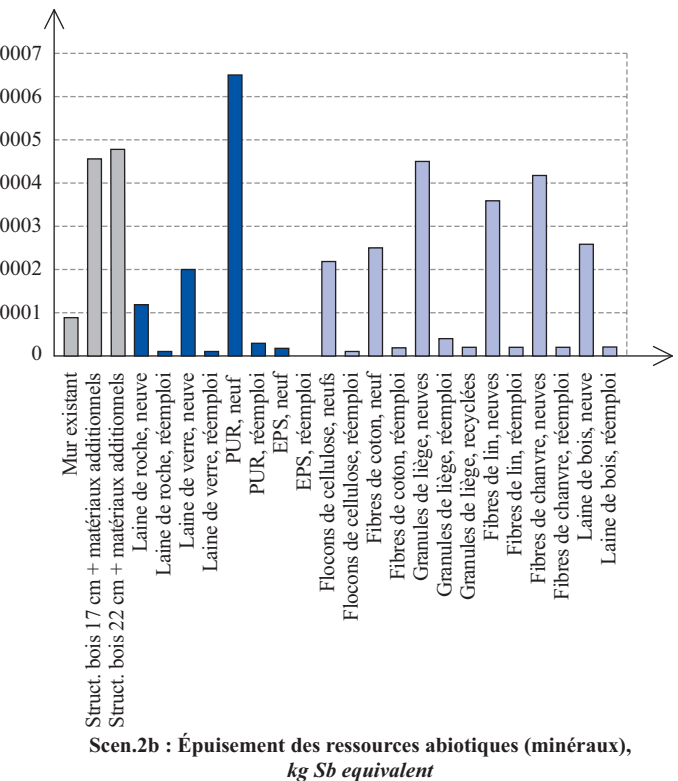
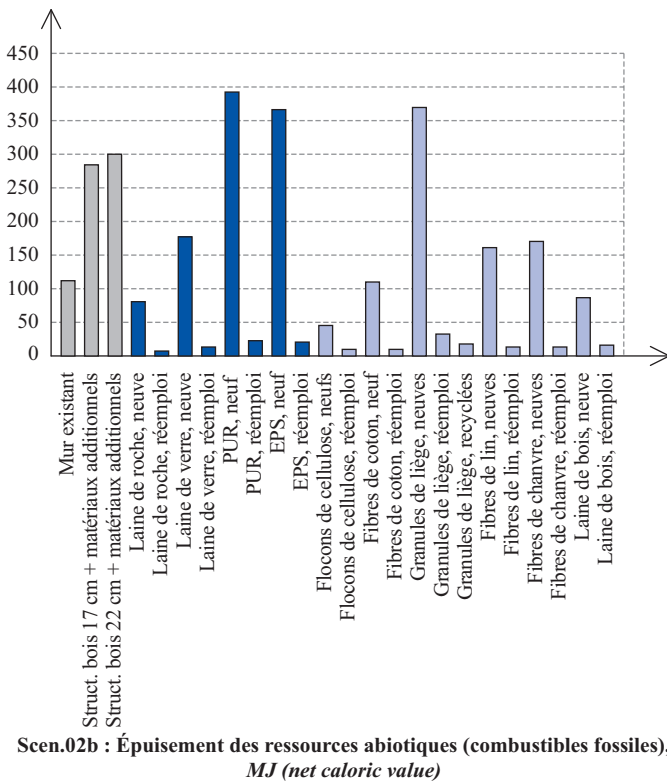
6.4 Perspectives

Les différentes études comparatives réalisées d'abord à partir des déclarations environnementales FDES puis avec l'outil

Totem montrent que les isolants biosourcés s'inscrivent dans une approche écoresponsable et circulaire. Cependant, les études mettent aussi en évidence des résultats contrastés lorsque ces isolants sont comparés entre eux, puis avec des isolants conventionnels. Ainsi, s'il est évident que les isolants biosourcés possèdent des atouts incontestables pour atteindre nos objectifs conjoints en matière de neutralité carbone et de gestion durable des ressources – grâce à la biomasse dont ils sont issus, à leur caractère renouvelable, à leur capacité à valoriser des déchets ou sous-produits d'autres secteurs, à leur capacité de stocker du carbone sur du temps long (voire très long s'ils sont réutilisés), à leur faible transformation et à un procédé de fabrication peu émissif –, ils ne constituent pas pour autant une garantie de meilleures performances environnementales par rapport à un isolant conventionnel. Ces performances doivent être analysées en tenant compte, d'une part, de l'ensemble du cycle de vie – de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie – et, d'autre part, de l'ensemble des flux entrants et sortants du système analysé, notamment l'apport de matières additives (fibres structurales synthétiques, agents biocides, ignifuges, etc.) entrant dans sa composition.



▲ Fig. 32. Évaluation d'un scénario d'isolation faisant varier le statut des matériaux isolants. Score environnemental global, en mPt, et réchauffement climatique en kg CO₂ éq., pour 1 m² de paroi isolée, répondant à l'exigence U = 0,24 W/m²K, sur la base d'une modélisation sur l'outil Totem (source : S. Trachte).



▲ Fig. 33. Évaluation d'un scénario d'isolation faisant varier le statut des matériaux isolants. Épuisement des ressources abiotiques fossiles, en MJ, et minérales, en kg Sb éq., pour 1 m² de paroi isolée, répondant à l'exigence U = 0,24 W/m²K, sur la base d'une modélisation sur l'outil Totem (source : S. Trachte).

Il est ainsi primordial d'apporter un soutien financier aux producteurs d'isolants biosourcés, afin de les aider à mener des ACV de leurs produits et à convertir celles-ci en déclarations environnementales. Ces études, dont le coût dépasse généralement les 10 000 €, représentent une charge importante pour des entreprises qui sont souvent de petite ou très petite taille, et qui ne disposent pas des ressources nécessaires pour les financer. Pourtant, ces données environnementales sont indispensables pour permettre une comparaison équitable avec les matériaux conventionnels, généralement fabriqués par de grandes, voire de très grandes entreprises.

7 Isolants biosourcés et économie circulaire

7.1 Principes de conception pour une construction réversible et circulaire

Les pratiques de conception, de construction et de rénovation doivent aujourd'hui évoluer pour permettre au secteur du bâtiment de s'inscrire pleinement dans les objectifs d'économie circulaire de l'UE et de ses pays membres. Depuis 2015, ces objectifs ont été progressivement renforcés au fil de l'évolution des plans d'action européens en faveur de l'économie circulaire. En 2022 notamment [106], une nouvelle série de mesures a été adoptée afin de stimuler le développement de produits durables fabriqués à partir de matières premières biosourcées et/ou de matières secondaires issues de la valorisation des déchets, ainsi que la conception réversible et circulaire des produits. Ces mesures visent à prolonger la durée d'usage des produits grâce au réemploi, à la réparation, à la remanufacture et au recyclage. Elles mettent également l'accent sur la conservation et l'accessibilité des données, *via* les passeports matériaux, ainsi que sur l'évaluation environnementale.

Le secteur de la construction doit ainsi s'engager à innover en développant de nouvelles solutions techniques et matérielles à partir des déchets générés, et à adopter une approche circulaire dans la conception des bâtiments, en travaillant sur le réemploi des matériaux, la réversibilité des assemblages, ainsi que la gestion et la valorisation des déchets de chantier.

Les principes de conception-construction circulaire sont fortement étudiés dans la littérature depuis une vingtaine d'années, notamment au travers des concepts de *Design for Adaptability* [107] [108] [109], *Design for Longevity* [110] [111], *Design for Change* [112] [113], *Design for Disassembly* [114] [115], *Design for Deconstruction* [116] [117] et *Design for Reuse* [118] [119]. Ils font aujourd'hui également l'objet de la norme ISO 20887 [120] adoptée par de nombreux pays européens, dont la France, ainsi que de nombreux guides et ouvrages.

Ils ne sont donc pas spécifiquement présentés de manière exhaustive dans cet article. Seuls les principes en lien avec les isolants biosourcés et leur mise en œuvre en rénovation sont détaillés dans les paragraphes suivants.

7.2 Co-produits, sous-produits et déchets : des matières valorisées par les isolants biosourcés

En ce qui concerne l'approvisionnement en matières premières, l'ACV distingue plusieurs catégories :

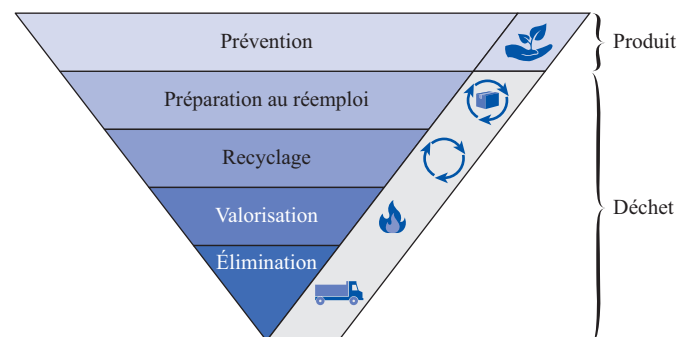
- les produits spécifiquement cultivés ou extraits du sol pour fabriquer un matériau (comme le coton ou la roche volcanique) ;
- les co-produits issus de l'agriculture ou d'autres secteurs industriels (tels que la paille, le chanvre ou le lin) ;
- les sous-produits (comme les balles de céréales, les résidus de scierie ou la cellulose provenant de papier recyclé) ;
- les déchets, considérés comme des résidus sans usage initial, destinés à être éliminés.

Il est ainsi essentiel de définir précisément ces notions de matière première et de matière secondaire, qu'il s'agisse de co-produits, de sous-produits ou de déchets, notamment pour les matériaux à forte teneur en matières recyclées, ainsi que pour les isolants biosourcés issus de la biomasse végétale. En effet, ces données influencent directement les résultats de l'évaluation environnementale du produit fini, mais également sa capacité à s'inscrire dans une économie circulaire en réduisant la pression sur les ressources naturelles par la valorisation de matières renouvelables sur temps courts et/ou de matières secondaires.

La directive 2008/98/CE du 19 novembre 2008 [121] relative aux déchets définit et hiérarchise, dans ses articles 3 à 11, les notions de déchet et de sous-produit, ainsi que les actions de prévention, de réemploi, de valorisation, de recyclage et d'élimination, au travers de l'échelle de Lansink présentée dans la figure 34.

Selon cette directive :

- constitue un *déchet* toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ;



▲ Fig. 34. Échelle de Lansink mettant en évidence la hiérarchie d'actions en termes de prévention et gestion des déchets (source : S. Trachte).

- la *prévention* correspond aux mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet et visant à réduire :
 - la quantité de déchets, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée de vie des produits,
 - les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine,
 - la teneur en substances nocives des matières et produits.

Les isolants biosourcés participent de manière importante à la prévention des déchets, en valorisant à la fois des déchets provenant de divers secteurs industriels et des matières secondaires produites par le secteur de l'agriculture. Dans les deux cas, ils permettent aussi d'éviter les effets nocifs produits par le traitement de ces matières, en tant que déchet, sur l'environnement. *Ces effets nocifs sont évités immédiatement*, contrairement à d'autres matériaux isolants qui se disent recyclables et réutilisables et dont les effets nocifs d'un traitement seront potentiellement évités dans le prochain cycle de vie, d'ici 30 à 60 ans.

Cette qualité n'est toutefois pas propre aux matériaux isolants biosourcés : certains isolants minéraux, comme le verre cellulaire, la laine de verre et la laine de roche, utilisent aussi des déchets et des sous-produits issus d'autres secteurs, comme les industries verrière et sidérurgique ;

- le *réemploi* désigne toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

L'UE ainsi que de nombreux États membres, tels que la France, la Belgique et les Pays-Bas, encouragent ses pratiques dans le secteur de la construction. Malgré le développement de nombreuses filières de réemploi et de revendeurs de matériaux de réemploi, les isolants thermiques restent peu présents sur le marché du réemploi, qui concerne principalement les laines minérales et les mousses synthétiques, à l'exclusion des isolants biosourcés. Ceci peut s'expliquer, d'une part, par l'absence de réel statut juridique de ces matériaux et le manque de garantie sur leurs performances après un premier usage et, d'autre part, par l'apparition encore récente de ces matériaux sur le marché.

Cependant, les isolants biosourcés, comme d'autres isolants conventionnels et un grand nombre de matériaux de construction, présentent un potentiel de réutilisation important ;

- le *recyclage* se définit comme l'opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage ;
- la *valorisation* désigne toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie.

Les isolants biosourcés produits à partir de *cellulose recyclée*, de *coton* et de *textiles recyclés* ou encore de *bouchons de liège* revalorisent des déchets provenant des industries papetières, textiles et viticoles en s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire. Le contenu de matières recyclées dans ces différents matériaux est très élevé, allant de 85 à 100 % (voir tableau 9). *L'isolant produit à partir de fibres d'herbe* mérite encore d'être souligné : il valorise à la fois les déchets de tonte produits par de nombreuses communes et agglomérations en Belgique et des déchets de jute. À nouveau, le contenu recyclé de cet isolant est élevé et atteint les 92 %.

De nombreux isolants biosourcés valorisent aujourd'hui des sous-produits ou co-produits agricoles qui, il y a encore une dizaine ou une vingtaine d'années, étaient considérés comme des déchets. Le tableau 10 met en évidence les différentes matières valorisées, en distinguant arbitrairement « co-produit » et « sous-produit » en fonction du développement actuel des filières ;

- l'*élimination*, enfin, correspond à toute opération qui n'est pas de la valorisation, même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances ou d'énergie.

▲ Tab. 9. Utilisation de déchets d'autres industries dans la production d'isolant biosourcé (source : S. Trachte)

Isolant biosourcé	Type de déchet	Industrie d'origine	Taux de matière secondaire
Cellulose recyclée – flocons	Papiers journaux usagés, broyés et défibrés	Industrie papetière	> 85 %
Coton recyclé – vrac	Fibres textiles	Industrie textile	85 à 100 %
Coton recyclé – matelas	Fibres textiles	Industrie textile	70 à 95 %
Fibres de bois – matelas	Déchets de scieries	Industrie du bois	85 à 95 %
Liège – vrac	Bouchons de liège	Industrie viticole	100 %

▲ Tab. 10. Utilisation des co-produits et sous-produits agricoles dans la production d'isolant biosourcé (source : S. Trachte).

Isolant biosourcé	Co-produit agricole ou forestier	Sous-produit agricole ou forestier	Taux de matière secondaire
Balles de céréales		×	100 %
Balles de riz		×	100 %
Chènevotte en vrac	×		100 %
Fibres de chanvre – vrac	×		100 %
Fibres de chanvre – matelas	×		85 à 90 %
Fibres de bois – vrac	×		100 %
Fibres de bois – matelas	×		85 à 95 %
Fibres de lin – matelas	×		80 %
Fibres mélangées – matelas	×		92 %
Fibres de mouton – vrac		×	100 %
Fibres de mouton – matelas		×	85 %
Paille de riz		×	90 %
Paille de céréales	×		100 %

Les scénarios de fin de vie et d'élimination envisagés actuellement par les fabricants des isolants biosourcés étudiés sont repris dans le tableau 11.

Il ressort de l'analyse que la plupart des isolants biosourcés étudiés sont principalement gérés, en tant que déchets, par enfouissement ou par incinération. Le compostage est envisagé pour certains isolants, comme la chènevotte, le chanvre en vrac ou la paille. La réutilisation directe en tant que matériau isolant est également possible pour le chanvre en vrac et le coton recyclé en vrac. Enfin, une réutilisation pour d'autres applications, notamment dans le secteur agricole (paillis ou litière), est étudiée pour les balles de riz et la paille.

7.3 Mise en œuvre et assemblage : quel potentiel de réversibilité pour les isolants biosourcés ?

La directive modificative (UE) 2018/851 du 30 mai 2018 [122] a renforcé les mesures sur l'économie circulaire et les règles relatives à la prévention des déchets, avec pour objectifs de soutenir des modèles de production et de consommation durables, et d'encourager la conception, la *fabrication* et l'*utilisation de produits* qui représentent une utilisation efficace des ressources, sont *durables, réparables, réutilisables et de conception évolutive*.

Pour qu'un matériau de construction soit réellement réutilisable, réemployable et/ou réparable, sa mise en œuvre doit être réversible, c'est-à-dire permettre son désassemblage, sans

l'abîmer et sans endommager les matériaux qui l'entourent. Ces principes de conception réversible sont soutenus par une série de concepts théoriques, dont le *Design for Disassembly*, le *Design for Deconstruction* et le *Design for Reuse* déjà énoncés plus haut.

La réversibilité d'une mise en œuvre et/ou d'un assemblage dépend d'une série de critères, notamment :

- la *géométrie de la connexion*, qui définit la manière dont les éléments s'assemblent entre eux. Elle peut être soit ouverte, soit fermée :
 - dans une géométrie ouverte, les éléments se juxtaposent les uns à côté des autres (géométrie linéaire) et/ou se recouvrent d'un côté ou des deux côtés (géométrie par recouvrement),
 - dans une géométrie fermée, les éléments sont intégrés les uns dans les autres ou se recouvrent de manière asymétrique.

Dans la plupart des techniques d'isolation, et en particulier lorsque l'isolant est placé dans une ossature en bois ou en métal ou encore dans un caisson, la connexion présente une géométrie ouverte, linéaire et simple. En revanche, dans certains cas d'isolation de toiture et de plancher où des panneaux rigides sont utilisés – tels que des panneaux de fibres de bois ou de liège –, la connexion entre panneaux est de plus en plus souvent de type « languette-rainure », un système plutôt fermé qui complique les opérations de démontage ultérieures ;

- le *type d'assemblage*. Pour la mise en œuvre des isolants thermiques, sont utilisés :
 - soit un assemblage dit « humide ou chimique », généralement à l'aide de colle ou de liant, qui empêche généralement

▲ Tab. 11. Type d'assemblage utilisé à la pose, chutes générées par la pose, existence d'une filière de collecte des chutes, classe de déchet et traitement proposé par le fabricant. Analyse pour 25 isolants biosourcés sur la base des déclarations françaises FDES (source : S. Trachte).

Isolant	Type de produit DEP	Type d'assemblage le plus fréquent	Chutes à la mise en œuvre (%)	Reprise des chutes par le producteur	Classe de déchets	Traitement proposé par le fabricant
Flocons de cellulose	Pavacof / Pavacell / Valocell / Doucel 145 mm Soprema	Par insufflation	2	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	42 % enfouissement 58 % incinération
Flocons de cellulose	Ouate de cellulose à insuffler 220 mm Cellaouate	Par insufflation	0,50	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	5 % compostage 40 % enfouissement 55 % incinération
Chenevete en vrac	Chenevete en vrac Association des chanvriers	Par déversement ou insufflation	0	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	25 % compostage 25 % réutilisation 50 % enfouissement
Balles de riz	Balles de riz Construire en balles	Par déversement ou insufflation	5	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	50 % incinération 50 % réutilisation en litière ou paillis
Coton recyclé vrac	Coton recyclé RFP RMT Isolation SL	Par déversement ou insufflation	0	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	12 % enfouissement 88 % réutilisation
Coton recyclé vrac	Coton recyclé Flocon Métisse	Par déversement ou insufflation	0	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Laine de chanvre en vrac	Laine de chanvre en vrac Association des chanvriers	Par déversement ou insufflation	0	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	25 % compostage 25 % réutilisation 50 % enfouissement
Laine de mouton en vrac	Laine de mouton en vrac Terre de laine	Par déversement ou insufflation	2	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	5 % enfouissement 95 % incinération
Coton recyclé matelas	Geopanel Passiv 80 Geopanel	Par friction, entre structure ou dans un caisson	2	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Coton recyclé matelas	Laine de coton Isoconfort Isover	Par friction, entre structure ou dans un caisson	5	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Coton recyclé panneau	Panneau Métisse RTMétisse	Par friction, entre structure ou dans un caisson	NS	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Fibres de coton, lin et chanvre, matelas	Biofib Trio Cavac matériaux	Par friction, entre structure ou dans un caisson	2	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement

Isolant	Type de produit DEP	Type d'assemblage le plus fréquent	Chutes à la mise en œuvre (%)	Reprise des chutes par le producteur	Classe de déchets	Traitement proposé par le fabricant
Fibres de bois matelas	Steico Flex	Par friction, entre structure ou dans un caisson	NS	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % incinération
Fibres de bois matelas, avec film polyester	Flex 40 Isolant	Par friction, entre structure ou dans un caisson	2	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Fibres de bois matelas	Pavaflex 140 mm Soprema	Par friction, entre structure ou dans un caisson	5	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Fibres de bois panneau	Pavawall 160 mm panneau	Par collage ou fixation mécanique (cheville à rosace)	5	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Fibres de bois panneau	Thermosafe + HomogenGutex	Par fixation mécanique (agrafe ou cheville à rosace et vis)	5	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	42 % incinération 43 % recyclage 7,5 % enfouissement 7,5 % cimenterie
Fibres de chanvre matelas	Biofib Chanvre Cavac matériaux	Par friction, entre structure ou dans un caisson	2	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Fibres d'herbe ensilées	Gramitherm 100	Par friction, entre structure ou dans un caisson	3	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % enfouissement
Laine de mouton en rouleau souple	Terre de laine	Par friction, entre structure ou dans un caisson	3	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	5 % enfouissement 95 % incinération
Paille de blé	Botte de paille de culture traditionnelle, RCP	Par friction, entre structure ou dans un caisson	0	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	70 % compostage 30 % réutilisation sous forme de paillis
Paille de blé	Botte de paille de 36 cm Isol'en paille	Par friction, entre structure ou dans un caisson	5,26	Oui	Classe 2, non inerte, non dangereux	100 % réutilisation sous forme de litière ou de paillis
Bloc de béton de chanvre	Biosys BCD VCAT	Par mortier, assemblage humide	5	Non	Classe 3	100 % enfouissement
Terre-chanvre à bancher	Association des chanvriers en circuits courts	Par projection sur support ou entre ossature, et/ou par banchage	5	Non	Classe 2, non inerte, non dangereux	50 % compostage 50 % réutilisation
Chaux-chanvre à projeter	Produit BVP Akta	Par projection sur support ou entre ossature	0	Non	Classe 3	100 % enfouissement

un démontage propre et une récupération des éléments. Il est dit alors « non réversible » ;

– soit un assemblage dit « sec ou mécanique », réalisé avec ou sans connecteurs indépendants, qui permet un démontage plus aisé et la récupération des éléments dans la plupart des cas. La plupart des isolants biosourcés, en vrac ou sous forme de matelas, sont mis en œuvre sans connecteur, par insufflation ou déversement pour les isolants en vrac, et par friction entre éléments de structure pour les matelas ;

• le *type d'éléments connecteurs*. Certains assemblages secs utilisent des connecteurs comme des vis, des clous ou des agrafes. Ces connecteurs peuvent endommager les matériaux isolants lors du démontage. Ces dommages sont soit réparables, soit non réparables. Dans le cas des isolants biosourcés sous forme de panneau rigide, des connecteurs mécaniques peuvent être utilisés pour la mise en œuvre, tels que des vis, des clous et/ou des chevilles de fixation. Dans le cas des matelas souples placés entre éléments de structure, des agrafes et des clous peuvent également être associés à l'assemblage par friction lorsque l'isolant présente un risque d'affaissement, notamment pour les parois verticales. Si les assemblages au moyen de ces connecteurs métalliques sont entièrement réversibles, les clous, les vis et les agrafes peuvent néanmoins endommager le matériau et allonger le temps nécessaire au démontage.

La figure 35 reprend les principaux assemblages utilisés pour la mise en œuvre des isolants biosourcés et conventionnels et analyse leur niveau de réversibilité.

Cette première analyse peut être complétée par une analyse de critères relatifs au démontage et à la manutention sur chantier, tels que la simplicité et rapidité des opérations de démontage ainsi que la facilité de manutention (fig. 36).











7.4 Potentiel de valorisation par le réemploi et le recyclage

Une fois arrivé en fin de vie ou en fin de cycle d'utilisation, tout isolant thermique, comme tout matériau de construction, peut faire l'objet d'une valorisation qui, selon sa nature et ses caractéristiques propres, peut prendre plusieurs formes. Un isolant peut ainsi être biodégradable, réutilisé ou réemployé, recyclé dans une filière de production pour obtenir des matériaux de valeur équivalente ou supérieure (recyclage⁽¹²⁾), ou de moindre valeur (décyclage⁽¹³⁾).

La plupart des isolants biosourcés présentent, au-delà de la réversibilité des assemblages avec lesquels ils sont mis en œuvre, un potentiel de valorisation important, soit par réemploi direct dans le secteur de la construction, soit par réemploi indirect dans un autre secteur, soit par recyclage ou réintroduction dans un procédé de fabrication.

Le potentiel de réemploi peut être estimé à l'aide de plusieurs indicateurs selon différentes échelles. Il s'agit notamment :











– *au niveau du matériau*, de la durée de vie, de la robustesse au montage et au démontage et de l'état du matériau après un premier cycle d'utilisation ;

Type d'assemblage	Type de fixation	Niveau de réversibilité
<i>Assemblage humide</i>	 Coulé dans la masse, projeté ou enduit	Non réversible
	 Fixation à l'aide de colle	
	 Fixation à l'aide de mortier-colle	
	 Fixation à l'aide de mortier chaux ou argile	
<i>Assemblage sec avec élément intermédiaire</i>	 Fixation mécanique dépendante (clous, agrafes)	Réversible avec dommages non réparables
	 Fixation mécanique indépendante (vis, boulons, etc.)	Réversible avec dommages légers et réparables
	 Fixation mécanique autonome (clips, crochets)	Réversible
<i>Assemblage sec sans élément intermédiaire</i>	 Fixation par emboîtement, superposition, juxtaposition	
	 Pose par friction ou insufflation, entre ossature	
	 Pose libre, avec ou sans lestage	

▲ Fig. 35. Principaux assemblages et modes de fixation des isolants et leur niveau de réversibilité (source : S. Trachte).

(12) Ou upcycling.

(13) Ou downcycling.

Type de fixation	Simplicité de désassemblage	Rapidité de désassemblage	Facilité de manutention
 Coulé dans la masse, projeté ou enduit  Fixation à l'aide de colle  Fixation à l'aide de mortier-colle  Fixation à l'aide de mortier chaux ou argile	L'assemblage n'étant pas réversible, les éléments sont arrachés et non démontés ou désassemblés. Les déchets sont placés dans un container mélangé, tout venant, sans tri préalable		
	Complexe	Nécessite du temps	Facile à manipuler
 Fixation mécanique dépendante (clous, agrafes)  Fixation mécanique indépendante (vis, boulons, etc.)  Fixation mécanique autonome (clips, crochets)	Simple	Rapide	Très facile à manipuler
	Très simple	Rapide	Facile à manipuler
	Très simple	Très rapide	Très facile à manipuler
 Fixation par emboîtement, superposition, juxtaposition  Pose par friction ou insufflation, entre ossature  Pose libre, avec ou sans lestage	Très simple	Très rapide	Très facile à manipuler
	Complexe	Nécessite du temps	Facile à manipuler
	Très simple	Très rapide	Très facile à manipuler

▲ **Fig. 36. Principaux assemblages et modes de fixation analysés en fonction de critères relatifs au démontage et à la manutention sur chantier** (source : S. Trachte, sur la base du travail réalisé avec E. Gobbo, dans le cadre du marché de service pour l'intégration de critères de réversibilité dans l'outil Totem).

- au niveau de l'application et de la mise en œuvre, du type d'application (intérieure ou extérieure, protégée, non protégée) et de la qualité de la mise en œuvre ;
- au niveau du tri sur chantier, de la facilité de démontage et de la qualité de tri, de collecte et de stockage.

Concernant le potentiel de recyclage, les indicateurs se limitent principalement à la qualité du tri, de la collecte et du stockage de l'isolant, qui doit être exempt de toutes impuretés. Une attention particulière doit également être portée au type d'application et à l'état du matériau.

Le tableau 12 met en évidence le potentiel théorique de valorisation des isolants biosourcés, que ce soit en réemploi ou en recyclage. Ce tableau ne tient pas compte de la présence de l'existence de filières de valorisation, élément essentiel pour permettre le réemploi ou le recyclage effectif de ces isolants. En effet, pour qu'un matériau isolant en fin de vie ou en fin de premier cycle d'utilisation puisse être valorisé, il est indispensable qu'une filière de traitement soit opérationnelle, idéalement à proximité du chantier de démontage et/ou du site de production, afin de réduire les coûts, ainsi que l'impact environnemental lié au transport. En outre, la viabilité de cette valorisation repose à la fois sur les quantités à valoriser et sur l'estimation de la valeur marchande du matériau transformé, condition essentielle à la rentabilité de la filière.

Ces filières sont encore inexistantes pour les isolants biosourcés, contrairement aux isolants conventionnels, pour lesquels existent déjà plusieurs initiatives telles que Rockcycle de Rockwool, Isover, Recycork pour le liège, Kingspan, Pirobouw et plus récemment la filière Resulation de Knauf

Insulation, en Belgique, qui recycle la laine de verre et le polystyrène expansé.

7.5 Le passeport matériau, ou comment garantir le réemploi à long terme

Le règlement (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024 sur l'écoconception des produits durables (ESPR⁽¹⁴⁾) [123] constitue le pilier central de la stratégie de l'UE pour promouvoir la conception de produits plus durables et circulaires. Il s'inscrit dans un ensemble de mesures clés visant à concrétiser les objectifs des plans d'action pour l'économie circulaire de 2020 et 2022 [106] et à accompagner la transition vers un modèle économique plus durable, circulaire et compétitif.

Ce règlement établit un cadre réglementaire imposant des exigences d'écoconception pour des catégories de produits spécifiques, dont les matériaux de construction, afin d'améliorer leur capacité à être réemployés, entretenus, réparés, remanufacturés et/ou recyclés. Les exigences portent également sur l'amélioration des performances environnementales, en évitant la présence de toute substance empêchant la réutilisation ou le recyclage, en développant des produits plus économes en énergie et en ressources, en augmentant leur contenu recyclé ou encore en réduisant leur empreinte carbone.

Une dernière exigence vise à renforcer la disponibilité des informations sur les produits, leurs performances et leur

(14) Ecodesign for Sustainable Products Regulation.

▲ Tab. 12. Potentiel théorique de valorisation des isolants biosourcés (source : S. Trachte).

Matériau isolant biosourcé	Forme du produit	Utilisation de co-produits ou sous-produits	Contenu recyclé	Taux de chutes à la mise en œuvre (% selon FIDES)	Système de reprise par le producteur	Potentiel de valorisation des déchets						
						Réemploi/Réutilisation	Prétraitement avant recyclage	Surcyclage ou réintroduction dans un cycle de fabrication	Décyclage	Valorisation organique	Récupération d'énergie	Mise en centre d'enfouissement
Matériaux isolants organiques naturels, issus de ressource végétale												
Paille de céréales	En vrac	100 %	/	5 %	Non	Envisageable	/	/	Litière animale	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Balles de céréales	En ballot	100 %	/	NS	Non	Envisageable	/	/	Litière animale	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	En vrac	100 %	/	5 %	Non	Envisageable	/	/	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	En vrac	100 %	100 % bouchons de liège	NS	Oui Recycork	Envisageable	/	Réintroduction dans la fabrication de béton allégé	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Liège	Panneau rigide	98 %	/	5 %	Oui Recycork	Dépend de l'assemblage	Broyage	Réintroduction dans la fabrication de béton allégé	Granules de liège	Non envisageable si expansé	Traitement actuel	Traitement actuel
Fibres de lin	Matelas souple	80 %	/	NS	Non	Envisageable	Broyage ou défibrage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	En vrac	100 %	/	0 %	Non	Envisageable	/	/	/	Envisageable si absence de fongicide	Traitement actuel	Traitement actuel
Fibres de chanvre	Matelas souple	85 à 90 %	/	2 %	Non	Envisageable	Broyage ou défibrage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	Panneau rigide	85 %	/	2 à 5 %	Non	Dépend de l'assemblage	Broyage ou défibrage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Granules de chanvre	En vrac	100 %	/	0 %	Non	Envisageable	/	Fabrication de chaux-chanvre	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Chaux-chanvre	Enduit et bloc	70 à 90 %	/	3 %	Non	Non envisageable	Broyage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	Granule de chanvre	Envisageable	NS	Traitement actuel
	Panneau rigide	70 à 90 %	/	3 %	Non	Non envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	Granule de chanvre	Envisageable	NS	Traitement actuel
Fibres mélangées de cellulose et chanvre	Matelas souple	30 %	60 % de papier recyclé	2 %	Oui Biofib	Envisageable	Broyage ou défibrage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel

Matériau isolant biosourcé	Forme du produit	Utilisation de co-produits ou sous-produits	Contenu recyclé	Taux de chutes à la mise en œuvre (% selon FDES)	Système de reprise par le producteur	Potentiel de valorisation des déchets						
						Réemploi Réutilisation	Prétraitement avant recyclage	Surcyclage ou réintroduction dans un cycle de fabrication	Décyclage	Valorisation organique	Récupération d'énergie	Mise en centre d'enfouissement
Fibres mélangées de cellulose et coton	En vrac	50 %	50 % de coton recyclé	NS	Non	Envisageable	/	/	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	Matelas souple	40 %	50 % de coton recyclé	2 %	Non	Envisageable	Broyage ou défibrage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Fibres mélangées de chanvre et lin	Matelas souple	90 %	/	NS	Non	Envisageable	Broyage ou défibrage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	Matelas souple	/	/	2 %	Oui Biofib	Envisageable	Broyage ou défibrage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Fibres d'herbe	Matelas souple	/	70 % d'herbes 20 % de jute recyclé	2 %	Non	Envisageable	Broyage ou défibrage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	Panneau rigide	100 %	/	NS	Non	Dépend de l'assemblage	/	/	/	Envisageable	NS	NS
Miscanthus	Bloc (avec chaux ou argile)	100 %	/	NS	Non	Non envisageable	Broyage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	Granulés en vrac	Envisageable	NS	NS
	En vrac non compacté	100 %	/	NS	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	NS	NS
Roseaux	Panneau rigide	100 %	/	NS	Non	Envisageable si non collé	Désassemblage du panneau et broyage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	Granulés en vrac	Envisageable si dépourvu de cerclages métalliques	Traitement actuel	Traitement actuel
Paille de riz	Panneau semi-rigide	90 %	/	5 %	Non	Envisageable	Broyage ou défibrage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	Paille en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	En vrac non compactés	100 %	/	5 %	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Balles de riz	En vrac compactés	100 %	/	5 %	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
	En vrac compactés	100 %	/	5 %	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel

Matériau isolant biosourcé	Forme du produit	Utilisation de co-produits ou sous-produits	Contenu recyclé	Taux de chutes à la mise en œuvre (% selon FDES)	Système de reprise par le producteur	Potentiel de valorisation des déchets						
						Réemploi Réutilisation	Prétraitement avant recyclage	Surcyclage ou réintroduction dans un cycle de fabrication	Décyclage	Valorisation organique	Récupération d'énergie	Mise en centre d'enfouissement
Granules de bois	En vrac	100 %	100 % des producteurs utilisent des déchets de bois	NS	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable si absence de fongicide	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Fibres de bois	En vrac	100 %	100 % des producteurs utilisent des déchets de bois	NS	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Matelas souple	90 à 95 %	/	/	5 %	Non	Envisageable	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Panneau rigide	85 à 90 %	/	/	5 %	Non	Dépend de l'assemblage	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Dépend de l'assemblage	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Matériaux isolants organiques naturels, issus de ressource animale												
Laine de mouton	En vrac	100 %	/	NS	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Matelas souple	70 à 100 %	/	/	5 %	Non	Envisageable	Broyage ou défilage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	Laine en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	Broyage ou défilage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	Laine en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Matériaux isolants organiques naturels issus des filières de recyclage												
Fibres de cellulose	En vrac	/	90 % de papier recyclé	2 %	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Matelas souple	/	/	90 % de papier recyclé	NS	Non	Envisageable	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Granules de cellulose	En vrac	/	100 % de papier recyclé	NS	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Fibres de coton	En vrac	/	90 à 100 % de coton recyclé	0 %	Non	Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	/	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Matelas souple	/	/	75 % de coton recyclé	2 %	Non	Envisageable	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Envisageable	Broyage ou défilage	Dépend du % de fibres synthétiques	Fibres en vrac	Non envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
Fibres de lin et papier	Panneau rigide	/	100 % chènevotte de lin et papier recyclé	NS	Non	Dépend de l'assemblage	Broyage ou défilage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel
						Dépend de l'assemblage	Broyage ou défilage	Réintroduction dans le même cycle de fabrication	/	Envisageable	Traitement actuel	Traitement actuel

durabilité. Ce renforcement devrait s'établir par le biais du « passeport numérique de produit » (DPP⁽¹⁵⁾). Cette carte d'identité numérique stockerait des informations pertinentes sur des produits, composants et/ou matériaux pour l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur (du consommateur au fabricant en passant par les autorités), pour soutenir la durabilité des produits et promouvoir leur circularité. Les informations stockées donneraient ainsi des indications sur la performance technique du produit ou du matériau, les matières premières utilisées et leur origine, les possibilités de réparation, le potentiel de recyclage, ainsi qu'une estimation des impacts environnementaux.

Ce passeport numérique peut ainsi être considéré comme une garantie pour soutenir les pratiques de réemploi à long terme dans le secteur de la construction et notamment le réemploi des isolants thermiques. Il permettrait également de promouvoir et de consolider une démarche écoresponsable en offrant à chaque acteur les informations nécessaires pour établir des choix conscients et durables, et pour prolonger la durée de vie des produits par une série de boucles s'alignant sur le concept des « 10 R »⁽¹⁶⁾ [124].

7.6 Discussion et perspective

Les isolants biosourcés s'inscrivent de manière globale dans une économie circulaire, et ce, sur l'ensemble de leur cycle de vie, de l'apport de matières premières jusqu'à leur valorisation en fin de cycle d'utilisation.

Les principaux atouts des isolants biosourcés sont les suivants :

- ils exploitent des ressources souvent locales, issues de la biomasse, sous forme de co-produits ou sous-produits, ainsi que des déchets d'autres secteurs. L'utilisation de ces matières dites « secondaires » permet de réduire fortement la pression sur les ressources naturelles et de valoriser certains déchets ;
- leur processus de fabrication nécessite peu de transformations, principalement mécaniques et physiques. Il est généralement peu énergivore et peu émissif. Les isolants ainsi produits restent relativement proches des ressources et/ou des matières secondaires utilisées ;
- grâce à leur variété de natures et de formes, ils proposent une diversité de solutions techniques, tant en extérieur qu'en intérieur, pour l'ensemble des parois de l'enveloppe d'un bâtiment. La plupart des solutions techniques se mettent en œuvre de manière réversible. Comme les isolants conventionnels, ils possèdent une longue durée de vie, généralement supérieure à 50 ans, lorsque leur mise en œuvre est de qualité.

(15) Digital Product Passport.

(16) Les 10 R sont les actions suivantes : refuser, repenser, réduire, réutiliser, réparer, remettre à neuf, remanufacturer, réaffecter, recycler et récupérer.

Malgré l'absence de filières structurées, tant pour la collecte des déchets de chantier que pour leur valorisation, les isolants biosourcés présentent un fort potentiel de réemploi et de recyclage.

8 Conclusion

Les isolants thermiques biosourcés, en tant que matériaux issus de ressources renouvelables ou de filières de recyclage, s'inscrivent pleinement dans les objectifs contemporains de transition écologique, de neutralité carbone et d'économie circulaire. Leur pertinence en réhabilitation énergétique du bâti ancien repose sur une combinaison de propriétés à la fois techniques, comme leur capacité à stocker la chaleur et à gérer la vapeur d'eau au sein de la paroi à laquelle ils sont associés, et environnementales, comme leur capacité à stocker du carbone biogénique sur des temps longs et à valoriser de co-produits et sous-produits.

Les analyses comparatives menées dans cet article, à partir des FDES et de l'outil d'évaluation environnementale *Totem*, montrent que les performances environnementales des isolants biosourcés sont globalement favorables, mais hétérogènes selon leur nature, leur forme, leur composition et leur scénario de fin de vie. Elles révèlent également que certains matériaux conventionnels peuvent, dans des cas spécifiques, présenter des impacts moindres, soulignant l'importance d'une approche multicritère et contextualisée. Enfin, elles mettent en évidence le besoin d'un soutien réglementaire et financier, en particulier pour les petites structures de production, afin de les aider à mener des ACV et d'obtenir des données environnementales indispensables pour une comparaison équitable avec d'autres isolants thermiques.

Au-delà de leur impact environnemental, les isolants biosourcés offrent un potentiel élevé de réversibilité, de réemploi et de recyclage, à condition que les filières de valorisation soient structurées et que les informations techniques soient accessibles.

Malgré leurs nombreux atouts en rénovation énergétique et les retours très positifs de ceux qui les utilisent, ces matériaux restent encore méconnus du grand public et trop peu exploités par les acteurs professionnels. Au vu des besoins actuels, tant en matériaux isolants qu'en main-d'œuvre spécialisée en rénovation, il est urgent de développer les connaissances, compétences et savoir-faire des acteurs de terrain. Cela passe par un accompagnement technique adapté et par un cadre réglementaire favorisant l'intégration de ces matériaux dans les pratiques professionnelles.

Enfin, ce travail met en lumière la nécessité d'une évolution des outils d'évaluation environnementale vers des approches dynamiques, intégrant la temporalité des émissions et les bénéfices du stockage de carbone biogénique. Il appelle à une reconnaissance accrue des matériaux biosourcés dans les

politiques publiques, les dispositifs de soutien et les référentiels normatifs, afin de favoriser leur déploiement massif dans le secteur du bâtiment.

9 Références

- [1] Directive (UE) 2018/844 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique, *JOUE* n° L 156 du 19 juin 2018, dernière modification par la directive (UE) 2024/1275 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments, *JOUE* n° L 2024/1275, 8 mai 2024.
- [2] Commission européenne, « Le pacte vert pour l'Europe – Notre ambition : être le premier continent neutre pour le climat », Europa, 2019, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr.
- [3] Commission européenne, « The EU Taxonomy's uptake on the ground », Europa, juin 2024, https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities/eu-taxonomys-uptake-ground_en.
- [4] Directive (UE) 2024/1275 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments, *JOUE* n° L 2024/1275 du 8 mai 2024, dernière modification par règlement délégué (UE) 2025/1511 de la Commission du 30 juin 2025, *JOUE* n° L 2025/1511 du 31 octobre 2025.
- [5] Ministère de la Transition écologique et solidaire, Ministère de la Cohésion des territoires, « Plan Climat – Plan rénovation énergétique des bâtiments », octobre 2017, www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Plan%20de%20r%C3%A9novation%20%C3%A9nerg%C3%A9tique_0.pdf.
- [6] Collard (Mathilde), « Label Bâtiment biosourcé, une évolution plus en concordance avec la RE 2020 », Karibati, juillet 2024, www.karibati.fr/label-batiment-biosource.
- [7] Trachte (Sophie), Stiernon (Dorothee), « Energy and Sustainable Renovation of Building Stock in Europe: The Environmental Benefits of Biobased Insulation Materials », *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, SBE25, Sustainable Built Environment Conference, Zürich, 25-27 juin 2025, <https://hdl.handle.net/2268/335945>.
- [8] Cerema, « EmiBio : un projet de recherche sur les émissions des matériaux biosourcés », 26 mai 2021, www.cerema.fr/fr/actualites/emibio-projet-recherche-emissions-materiaux-biosources.
- [9] UGent, WTCB, Odisee, « To be or not to be bio », Milieubewustisoleren, <https://milieubewustisoleren.be>.
- [10] Cerema, « Matériaux biosourcés », www.cerema.fr/fr/mots-cles/materiaux-biosources.
- [11] Claude (Vincent), Charron (Stéphane), Michaux (Benoît), « Guide pratique des isolants biosourcés/recyclés et de leur mise en œuvre », Buildwise, Innovation Paper n° 47, juillet 2025, www.buildwise.be/fr/publications/innovation-papers/47/.
- [12] Leonardon (Philippe), Jimenez (Christel), Favre (Bérenger) *et al.*, « Prospective de consommation de matériaux pour la rénovation énergétique BBC des bâtiments résidentiels aux horizons 2035 et 2050 », Ademe, 2019, p. 139, www.actu-environnement.com/media/pdf/news-34726-etude-ademe-besoin-materiaux-renovation-decembre2019.pdf.
- [13] Trachte (Sophie), Stiernon (Dorothee), *Isolants thermiques en rénovation – Réaliser un choix équilibré entre confort, performance énergétique, approche environnementale et gestion circulaire des ressources*, Lausanne, EPFL Press, 2023.
- [14] Brard (Jennifer), « Les isolants biosourcés », *Construction 21*, 23 janvier 2024, www.construction21.org/france/articles/h/vers-une-reconnaissance-des-materiaux-biosources.html.
- [15] Programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique (Pacte), « Analyse détaillée du parc résidentiel existant », Agence qualité construction (AQC), juillet 2017, version 2.0, www.proreno.fr/documents/analyse-detaillée-du-parc-residentiel-existant-1.
- [16] Le Laboratoire de l'immobilier, « L'âge du parc de logements », 13 avril 2023, www.labo-immo.org/selection/lage-du-parc-de-logements/.
- [17] Webb (Amanda L.), « Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, septembre 2017, p. 748-759, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>.
- [18] Van de Voorde (Stephanie), Bertels (Inge), Wouters (Ine), « Post-war building materials in housing in Brussels 1945-1975 », Vrije Universiteit Brussel, 2015, https://cris.vub.be/ws/portalfiles/portal/18209694/post_war_building_materials_VUB_Boek_web.pdf.
- [19] Trachte (Sophie), Evrard (Arnaud), Cauwerts (Coralie), Fiches typologiques du bâti résidentiel bruxellois, B³-RetroTool, Architecture et Climat, UCLouvain, 2015, www.brusselsretrofitxl.be/documentation/retrofitting-themes/brussels-housing-typologies/.
- [20] Trachte (Sophie), Stiernon (Dorothee), « P-Renewal Project: A Reflexive Contribution to the Evolution of Energy Performance Standards for the Renovation of Historic Buildings », *Heritage*, vol. 7, n° 3, 2024, p. 1539-1568, <https://doi.org/10.3390/heritage7030074>.
- [21] ISO 13787 (mai 2003) : Produits isolants thermiques pour l'équipement du bâtiment et les installations industrielles – Détermination de la conductivité thermique déclarée.
- [22] NF EN 16575 (octobre 2014 – indice de classement : X 85-001) : Produits biosourcés – Vocabulaire.
- [23] FRD-Codem *et al.*, « Panorama des marchés – Fibres végétales techniques en matériaux (hors bois)

en France – Mémento 2020 », 2020, www.f-r-d.fr/etudes/m%C3%A9mento-2020/.

[24] Bono (Pierre), Le Duc (Anne), Lozachmeur (Marie), Day (Arnaud), « Matériaux : les nouveaux champs de recherche et développement pour la valorisation des fibres végétales techniques (lin fibres et chanvre) », *OCL*, vol. 22, n° 6, novembre-décembre 2015, art. D613, <https://doi.org/10.1051/ocl/2015041>.

[25] NF EN 16785-1 (janvier 2016 – indice de classement : X 85-008-1) : Produits biosourcés – Teneur biosourcée – Partie 1 : détermination de la teneur biosourcée par une analyse au radiocarbone et une analyse élémentaire.

[26] NF EN 16640 (avril 2017 – indice de classement : X 85-002) : Produits biosourcés – Teneur en carbone biosourcé – Détermination de la teneur en carbone biosourcé par la méthode au radiocarbone.

[27] Karibati, « Label Produit biosourcé », www.karibati.fr/nos-outils/label-produit-biosource.

[28] Ministères Transition écologique, Aménagement du territoire, Transports, Ville et Logement, « Label Bâtiment biosourcé », 23 octobre 2024, www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/materiaux-construction-biosources-geosources.

[29] Produit biosourcé, www.produitbiosource.eu/produits.

[30] DIN Certco, « Biobased products », www.dincertco.de/din-certco/en/main-navigation/products-and-services/certification-of-products/environmental-field/biobased-products/.

[31] TÜV Austria, « TÜV Austria Certification Scheme: OK biobased Renewable Resources », <https://okcert.tuvaustria.com/ok-biobased-en/>.

[32] Produit biosourcé, « Le label : votre garantie en contenu biosourcé », <https://produitbiosource.eu/label>.

[33] Arrêté du 2 juillet 2024 [NOR : TREL2401164A] relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label prévu à l'article D. 171-6 du Code de la construction et de l'habitation, *JO* du 5 juillet 2024.

[34] Arts et Métiers ParisTech, BioBuild Concept, Nomadéis *et al.*, « Benchmark biosourcés in the world – Panorama de l'usage des matériaux de construction biosourcés dans 15 pays », p. 168, www.institutparisregion.fr/fileadmin/DataStorageKit/AREC/Etudes/pdf/bbmworld_rapport_fin_v71.pdf.

[35] Chambres d'agriculture France, « Les chiffres clés 2024 de l'agriculture française », février 2025, https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=204699.

[36] Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire, « Infographie – Les fruits et légumes : une production arboricole, fruitière et maraîchère très diversifiée », 17 mars 2023, <https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-fruits-et-legumes-une-production-arboricole-fruitiere-et-maraichere-tres>.

[37] Madurwar (Mangesh V.), Ralegaonkar (Rahul V.), Mandavgane (Sachin A.), « Application of agro-waste for sus-

tainable construction materials: A review », *Construction and Building Materials*, vol. 38, janvier 2013, p. 872-878, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>.

[38] Amziane (Sofiane), Sonebi (Mohammed), « Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate », *RILEM Technical Letters*, vol. 1, 2016, p. 31-38, <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.9>.

[39] Rahim (Mourad), Douzane (Omar), Tran Le (Anh Dung) *et al.*, « Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 102, 2016, p. 679-687, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>.

[40] Hajj Obeid (Maya), Douzane (Omar), Freitas Dutra (Lorena) *et al.*, « Physical and Mechanical Properties of Rapeseed Straw Concrete », *Materials*, vol. 15, n° 23, 2022, art. 8611, <https://doi.org/10.3390/ma15238611>.

[41] Harb (Elias), Maalouf (Chadi), Bliard (Christophe) *et al.*, « Hygrothermal performance of multilayer wall assemblies incorporating starch/beet pulp in France », *Construction and Building Materials*, vol. 445, 27 septembre 2024, art. 137773, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137773>.

[42] Harb (Elias), Maalouf (Chadi), Bliard (Christophe) *et al.*, « Thermal performance of starch/beet-pulp composite bricks for building insulation at a wall scale », *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, juillet 2023, art. e01851, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01851>.

[43] Karaky (Hamzé), Maalouf (Chadi), Bliard (Christophe) *et al.*, « Elaboration and physical characterization of an agro-material based on sugar beet pulp and potato starch », *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 35, n° 2, 2017, p. 606-612, <https://doi.org/10.26168/icbbm2017.91>.

[44] Bovo (Marco), Giani (Niccolò), Barbaresi (Alberto) *et al.*, « Contribution to thermal and acoustic characterization of corn cob for bio-based building insulation applications », *Energy and Buildings*, vol. 262, 2022, art. 111994, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111994>.

[45] Okeke (Francis O.), Ahmed (Abdullahi), Imam (Adil), *et al.*, « A review of corncob-based building materials as a sustainable solution for the building and construction industry », *Hybrid Advances*, vol. 6, 2024, art. 100269, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100269>.

[46] Da Silva (Lucas), carte « Forêts et surfaces boisées en Europe », Toute l'Europe, 15 février 2022, www.touteleurope.eu/agriculture-et-peche/forets-et-surfaces-boisees-en-europe/.

[47] Hout Info Bois, « Les forêts européennes gagnent du terrain », janvier 2020, www.houtinfobois.be/wp-content/uploads/2020/01/86_FR_gestionforeteuropeenne_janvier2020.pdf.

[48] France Bois Forêt, « La filière forêt-bois », <https://france-boisforet.fr/la-foret/la-foret-francaise-en-chiffres/>.

- [49] Wang (Yingying), Zhang (Sudan), Wang (Dengjai) *et al.*, « Experimental study on the influence of temperature and humidity on the thermal conductivity of building insulation materials », *Energy and Built Environment*, vol. 4, n° 4, 2023, p. 386-398, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.02.008>.
- [50] Nguyen (Dang Mao), Grillet (Anne-Cécile), Bui (Quoc-Bao) *et al.*, « Building bio-insulation materials based on bamboo powder and bio-binders », *Construction and Building Materials*, vol. 186, 2018, p. 686-698, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.153>.
- [51] Cf. <https://fiboo.fr>.
- [52] Cf. www.isoschelp.nl.
- [53] Cf. www.neptugmbh.de.
- [54] Les rédactions normande et bretonne, « Filière algues : le nouvel or vert de la Normandie ? », *Le Journal des Entreprises*, 11 octobre 2024, www.lejournaldesentreprises.com/article/filiere-algues-le-nouvel-or-vert-de-la-normandie-2103236.
- [55] Cf. www.gramitherm.eu.
- [56] Cf. www.hiss-reet.de/en.
- [57] Cf. www.rizhome.fr.
- [58] Bacci (Laura), Baronti (Silvia), Predieri (Stefano) *et al.*, « Fiber yield and quality of fiber nettle (*Urtica dioica* L.) cultivated in Italy », *Industrial Crops and Products*, vol. 29, n° 2-3, 2009, p. 480-484, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.09.005>.
- [59] Viotti (Chloé), Albrecht (Katharina), Amaducci (Stefano) *et al.*, « Nettle, a Long-Known Fiber Plant with New Perspectives », *Materials*, vol. 15, n° 12, 2022, art. 124288, <https://doi.org/10.3390/ma15124288>.
- [60] Cf. www.permafungi.be.
- [61] Petit (Iona), Weber (Marline), « Plan d'action économie circulaire – La Commission propose un changement de paradigme », Institut national de l'économie circulaire (Inec), https://institut-economie-circulaire.fr/wp-content/uploads/2022/05/INEC_PaquetEurope%CC%81en.pdf.
- [62] Olivier (Arthur), Ledroit (Valentin), « Qu'est-ce que le pacte vert pour l'Europe ? », Toute l'Europe, 19 mai 2025, www.touteurope.eu/environnement/qu-est-ce-que-le-pacte-vert-pour-l-europe/.
- [63] Gauzin-Müller (Dominique), Le Bihan (Yann), Lemoine (Louise), Tric (Zoé), « Materia Architectures – 40 bâtiments en pierre, terre et fibres végétales », Pavillon de l'Arsenal, Paris, 2025.
- [64] Valbiom, « Présentation stratégique – Les filières bio-sourcées en Wallonie », 2024, <https://www.valbiom.be/outils/presentation-strategique-valbiom>.
- [65] Jeu de données « Atlas des acteurs biosourcés et géosourcés », Ekopolis, www.ekopolis.fr/atlas-acteurs-biosources-geosources.
- [66] Dace (Elina), Cascavilla (Alessandro), Bianchi (Marco) *et al.*, « Barriers to transitioning to a circular bio-based economy: Findings from an industrial perspective », *Sustainable Production and Consumption*, vol. 48, 2024, p. 407-418, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.029>.
- [67] Göswein (Verena), Arehart (Jay), Phan-huy (Catherine) *et al.*, « Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings », *Buildings & Cities*, vol. 3, n° 1, 2022, p. 745-755, <https://doi.org/10.5334/bc.254>.
- [68] NF EN ISO 10456 (juin 2008 – indice de classement : P 75-110) : Matériaux et produits pour le bâtiment – Propriétés hygrothermiques – Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles.
- [69] Cf. www.inies.fr/inies-et-ses-donnees/fdes-produits-de-construction/.
- [70] Palumbo (Mariana), Lacasta (Ana María), Holcroft (Neal) *et al.*, « Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials », *Construction and Building Materials*, vol. 124, 2016, p. 269-275, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106>.
- [71] Fedorik (Filip), Zach (Jiri), Lehto (Marja) *et al.*, « Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials », *Energy and Buildings*, vol. 253, 2021, art. 111528, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111528>.
- [72] Cerema, Maisons paysannes de France, Atheba, fiches « Amélioration thermique du bâti ancien », Maisons paysannes de France, <https://maisons-paysannes.org/actions/economies-denergie/#atheba-amelioration-thermique-du-bati-ancien>.
- [73] Dubois (Samuel), Desarnaud (Julie), Vanhellemont (Yves) *et al.*, « Contribution of photogrammetry and sensor networks to the energy diagnosis of occupied historical buildings », in Vandesande (Aziliz), Verstryngue (Els), Van Balen (Koenraad) (dir.), *Preventive Conservation: From Climate and Damage Monitoring to a Systemic Approach – Proceedings of the International WTA – PRECOM3OS Symposium, April 3-5, 2019, Leuven, Belgium*, Londres, CRC Press, 2020, p. 145-152, <https://doi.org/10.1201/9781003004042-22>.
- [74] Gomes Barbosa (Maria Teresa), Rosse (Vicente Junio), Laurindo (Náira Gaudereto), « Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on building facades », *Journal of Building Engineering*, vol. 43, 2021, art. 102555, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102555>.
- [75] Moya (Jean-Pierre), *Isolation thermique durable des bâtiments existants – Choix multicritères – Manuel pratique*, Éd. du Moniteur, 2^e éd., 2025.
- [76] Viel (Marie), Collet (Florence), Lecieux (Yann) *et al.*, « Development of a Method for Assessing Resistance to Mold Growth: Application to Bio-based Composites », *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol. 29, 2019, p. 261-274, <https://doi.org/10.18280/rcma.290410>.
- [77] Evrard (Arnaud), Branders (Aline), De Herde (André), *Guide Isolin Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines*, Architecture et Climat, UCLouvain, avril 2011.

- [78] Le Bayon (Isabelle), Draghi (Marjorie), Gabillé (Martine) *et al.*, « Development of a laboratory test method to assess the resistance of bio-based insulation materials against moulds », *Academic Journal of Civil Engineering*, 2015, p. 605-612, <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.93>.
- [79] Palumbo (Mariana), « Contribution to the development of new bio-based thermal insulation materials made from vegetal pith and natural binders: Hygrothermal performance, fire reaction and mould growth resistance », thèse sous la direction d'Ana Maria Lacasta et Jaume Avellaneda, Universidad Politècnica de Catalunya, 2015, <https://upcommons.upc.edu/entities/publication/5b334ab8-d0c4-4cd0-bb00-465c34cc9492>.
- [80] NF EN 13501-1 (décembre 2018 – indice de classement : P 92-800-1) : Classement au feu des produits et éléments de construction – Partie 1 : classement à partir des données d'essais de réaction au feu.
- [81] Cf. Association pour la certification des matériaux isolants (Acermi), « Pourquoi une certification ? », www.acermi.com/fr/marque-acermi/pourquoi-une-certification.
- [82] Architecture et Climat, « Pare-vapeur », Énergie plus, 25 septembre 2007, <https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/composants-de-l-enveloppe/isolants-et-pare-vapeur/pare-vapeur/>.
- [83] ISO 14040 (juillet 2006) : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre.
- [84] Cf. www.inies.fr.
- [85] Streimikiene (Dalia), Skulskis (Virgilijus), Balezentis (Tomas) *et al.*, « Uncertain multi-criteria sustainability assessment of green building insulation materials », *Energy and Buildings*, vol. 219, 2020, art. 110021, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110021>.
- [86] ISO 14044 (juillet 2006) : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.
- [87] ISO 14025 (juillet 2006) : Marquages et déclarations environnementaux – Déclarations environnementales de Type III – Principes et modes opératoires.
- [88] NF EN 15804+A2 (octobre 2019 – indice de classement : P 01-064) : Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction.
- [89] Comité européen de normalisation (CEN), « Sustainability, safety and accessibility », CEN-Cenelec, www.cencenelec.eu/areas-of-work/cen-sectors/construction/sustainability-safety-and-accessibility/.
- [90] ISO 14024 (février 2018) : Labels et déclarations environnementaux – Délivrance du label environnemental de type I – Principes et procédures.
- [91] Su (Shu), Li (Xiaodong), Zhu (Yimin) *et al.*, « Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings », *Energy and Buildings*, vol. 149, 2017, p. 310-320, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.042>.
- [92] Fnais (Abdulrahman), Rezgui (Yacine), Petri (Ioan) *et al.*, « The application of life cycle assessment in buildings: Challenges, and directions for future research », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 27, n° 5, 2022, p. 627-654, <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02058-5>.
- [93] Lasvaux (Sébastien), Achim (Fanny), Garat (Philippe) *et al.*, « Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters? », *Ecological Indicators*, vol. 67, 2016, p. 174-182, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.056>.
- [94] NF EN 15978 (mai 2012 – indice de classement : P 01-067) : Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Évaluation de la performance environnementale des bâtiments – Méthode de calcul.
- [95] Cerema, « L'analyse du cycle de vie, outil pour l'écoconception : le webinaire du 1^{er} février 2022 », 16 février 2022, www.cerema.fr/fr/actualites/analyse-du-cycle-vie-outil-eco-conception-webinaire-du-1er.
- [96] Cabassud (Nicolas), « Guide RE 2020 – Réglementation environnementale – Éco-construire pour le confort de tous », janvier 2024, www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/guide_re2020_version_janvier_2024.pdf.
- [97] Nicolas (Julie), « Impact carbone : les derniers arbitrages de la RE 2020 décryptés », *Le Moniteur*, 26 février 2021, www.lemoniteur.fr/article/les-derniers-arbitrages-de-la-re-2020-decryptes.2131759.
- [98] Azari (Rahman), Abbasabadi (Narjes), « Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends », *Energy and Buildings*, vol. 168, 2018, p. 225-235, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.003>.
- [99] Chastas (Panagiotis), Theodosiou (Theodoros), Bikas (Dimitrios), « Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review », *Building and Environment*, vol. 105, 2016, p. 267-282, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.040>.
- [100] Heravi (Gholamreza), Abdolvand (Mohammad Mehdi), « Assessment of water consumption during production of material and construction phases of residential building projects », *Sustainable Cities and Society*, vol. 51, 2019, art. 101785, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101785>.
- [101] Silva (Marta Denise), Montenegro (Duarte André), Vinagre (Marco Valerio), « Real and Virtual Water in Civil Construction », in da Costa Sanches Galvão (João Rafael), Duque de Brito (Paulo Sérgio), dos Santos Neves (Filipe) *et al.* (dir.), *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2021)*, Cham, Springer, 2021, p. 754-762.
- [102] Hoekstra (Arjen), « Virtual water: An introduction », in *id.* (dir.), « Virtual Water Trade: Proceedings of the

International Expert Meeting on Virtual Water Trade, IHE Delft, The Netherlands 12-13 December 2002 », IHE Delft, février 2003, p. 13-23.

[103] Zimmer (Daniel), *L'empreinte eau – Les faces cachées d'une ressource vitale*, Éd. Charles Léopold Mayer, 2013.

[104] Charpentier Poncelet (Alexandre), « Recommandations pour l'amélioration d'un outil d'analyse de cycle de vie environnementale : mesure de l'incertitude et caractérisation des impacts de la consommation d'eau », essai sous la direction de Bertrand Laratte, Université de technologies de Troyes, 2017, <http://hdl.handle.net/11143/11294>.

[105] Cf. www.totem-building.be.

[106] Commission européenne, « Circular Economy », Europa, https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en.

[107] Heidrich (Oliver), Kamara (John), Maltese (Sebastiano) *et al.*, « A critical review of the developments in building adaptability », *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 35, n° 4, 2017, p. 284-303, <https://doi.org/10.1108/IJBPA-03-2017-0018>.

[108] Askar (Rand), Bragança (Luís), Gervásio (Helena), « Adaptability of Buildings: A Critical Review on the Concept Evolution », *Applied Sciences*, vol. 11, n° 10, 2021, art. 4483, <https://doi.org/10.3390/app11104483>.

[109] Pinder (James A.), Schmidt (Rob), Austin (Simon A.) *et al.*, « What is meant by adaptability in buildings? », *Facilities*, vol. 35, n° 1-2, 2017, p. 2-20, <https://doi.org/10.1108/F-07-2015-0053>.

[110] Straka (Vera), « Designing for longevity », in « Eco-Architecture: Harmonisation between Architecture and Nature », *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 86, 2006, p. 277-286, <https://doi.org/10.2495/ARC060281>.

[111] Veseli (Edon), « Future-Proofing Residential Buildings: Designing for Longevity and Adaptability », thèse sous la direction de Bige Tunçer, Eindhoven University of Technology, 2025, <https://research.tue.nl/en/studentTheses/future-proofing-residential-buildings/>.

[112] Galle (Waldo), « Design for Change: Towards a circular economy in construction », Vrije Universiteit Amsterdam, 2017, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23275.75041>.

[113] Kamara (John M.), Heidrich (Oliver), Tafaro (Vincenza E.) *et al.*, « Change Factors and the Adaptability of Buildings », *Sustainability*, vol. 12, n° 16, 2020, art. 6585, <https://doi.org/10.3390/su12166585>.

[114] Durmišević (Elma), « Reversible building design », in Charter (Martin) (dir.), *Designing for the Circular Economy*, Abingdon-on-Thames, Routledge, 2018, p. 344-359.

[115] Cruz Rios (Fernanda), Chong (Wai K.), Grau (David), « Design for Disassembly and Deconstruction – Challenges and Opportunities », *Procedia Engineering*, vol. 118, 2015, p. 1296-1304, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.485>.

[116] Akinadé (Olúgbéngá), Oyedele (Lukumo), Oyedele (Ahmed) *et al.*, « Design for deconstruction using a circular economy approach: Barriers and strategies for improvement », *Production Planning & Control*, vol. 31, n° 10, 2020, p. 1-12, <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1695006>.

[117] Kanters (Jouri), « Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art », *Buildings*, vol. 8, n° 11, 2018, art. 150, <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>.

[118] Gorgolewski (Mark), « Designing with reused building components: Some challenges », *Building Research & Information*, vol. 36, n° 2, 2008, <https://doi.org/10.1080/09613210701559499>.

[119] Kozminska (Urszula), « Circular design: Reused materials and the future reuse of building elements in architecture. Process, challenges and case studies », *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 225, 2019, art. 012033, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012033>.

[120] ISO 20887 (janvier 2020) : Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil – Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité – Principes, exigences et recommandations.

[121] Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, *JOUE* n° L 312 du 22 novembre 2008, dernière modification par directive (UE) 2025/1892 du Parlement européen et du Conseil du 10 septembre 2025, *JOUE* n° L 2025/1892 du 26 septembre 2025.

[122] Directive (UE) 2018/851 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets, *JOUE* n° L 150/109 du 14 juin 2018.

[123] Règlement (UE) 2024/1781 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception pour des produits durables, modifiant la directive (UE) 2020/1828 et le règlement (UE) 2023/1542 et abrogeant la directive 2009/125/CE, *JOUE* n° L, 2024/1781 du 28 juin 2024, dernière modification par rectificatif au règlement (UE) 2024/1781 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024, *JOUE* n° L 2025/90356 du 28 avril 2025.

[124] Reike (Denise), Vermeulen (Walter J. V.), Witjes (Sjors), « Conceptualization of Circular Economy 3.0: Synthesizing the 10R Hierarchy of Value Retention Options », in Alvarez-Risco (Aldo), Rosen (Marc A.), Del-Aguila-Arcenales (Shyla) (dir.), *Towards a Circular Economy: Transdisciplinary Approach for Business*, Cham, Springer, 2022, p. 47-69.

[125] Statbel, « Statistique cadastrale du parc de bâtiments », Statbel, 2025, <https://statbel.fgov.be/fr/open-data/statistique-cadastrale-du-parc-de-batiments>.

[126] Label Produit Biosourcé, « Le label Produit Biosourcé », 2025, <https://www.produitbiosource.eu/label>.

Isolation thermique durable des bâtiments existants



55 €

Guide de référence pour une isolation thermique durable, alliant performance énergétique, respect du bâti existant et solutions concrètes pour réussir la rénovation des bâtiments

Véritable guide méthodologique, cet ouvrage propose une approche complète et opérationnelle de l'isolation thermique des bâtiments existants. Il aide les professionnels à choisir et mettre en œuvre des solutions durables conciliant performance énergétique, respect du bâti, confort d'été et exigences environnementales.

Cette démarche est complétée par un outil opérationnel contenant un tableau synoptique (tableur Excel) de l'ensemble des isolants disponibles sur le marché, y compris les isolants dits « biosourcés » ; il est muni de critères de tri et de filtres permettant d'aboutir rapidement à une liste réduite d'options dans une situation donnée.

NOUVEAUTÉ

Jean-Pierre Moya

2^e édition - Novembre 2025

312 pages - 21x 27 cm

Réf. **114780**

BON DE COMMANDE

À renvoyer avec votre règlement aux **Éditions du Moniteur** - Case 61
20 rue des Aqueducs - CS 30568 94255 Gentilly Cedex

Titre	Réf.	Prix TTC	Qté	Total TTC
Isolation thermique durable des bâtiments existants	114780	55 €		
Je règle les				
○ Frais d'envoi – France métropolitaine (livraison en Colissimo)				+1 €
○ Frais d'envoi - Union Européenne : 8,90 € par article				+.....€
○ Frais d'envoi - DOM TOM et reste du monde : 14,90 € par article				+.....€
W3088		TOTAL	€

► Règlement par :

Chèque à l'ordre des **Éditions du Moniteur**

Signature et date obligatoires :

Paiement sécurisé par carte bancaire, commandez sur notre site **boutique.lemoniteur.fr**

*Informations non contractuelles

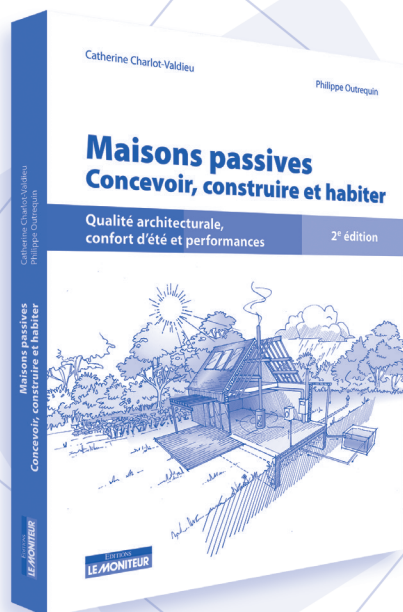
Tarifs valables jusqu'au 31/03/2026. Les informations à caractère personnel recueillies ci-dessus font l'objet d'un traitement par la société GROUPE MONITEUR afin de traiter et d'exécuter votre commande. Elles sont conservées dans un fichier informatique que GROUPE MONITEUR ou toute société du groupe Infopro Digital, dont GROUPE MONITEUR fait partie, pourra utiliser afin de vous envoyer des propositions utiles à votre activité professionnelle. Toute demande liée à l'exercice de vos droits d'accès, d'opposition, de suppression, de retrait du consentement doit être envoyée à l'adresse suivante : privacy-editions@infopro-digital.com. La politique en matière de données personnelles du groupe Infopro Digital est disponible à l'adresse : <https://www.infopro-digital.com/fr/protection-des-donnees/fr/>.

Acceptez-vous de recevoir des propositions utiles à votre activité professionnelle de la part de tiers ?

Oui Non



Maisons passives : Concevoir, construire et habiter



64 €

NOUVEAUTÉ

Allier performance énergétique, confort et qualité de vie : tel est l'enjeu du bâtiment passif

Allier confort, qualité de l'air et sobriété énergétique : tel est le défi que relève *Maisons passives*. Entièrement actualisé, cet ouvrage dévoile les principes, méthodes et solutions techniques du standard passif à travers 26 réalisations exemplaires en France.

Plans, analyses, performances et retours d'expérience en font une référence incontournable pour comprendre et maîtriser la construction passive, pilier de l'habitat durable de demain..

**Catherine Charlot-Valdieu
et Philippe Outrequin**

2^e édition - Décembre 2025

336 pages - 21x 27 cm

Réf. **114829**

BON DE COMMANDE

À renvoyer avec votre règlement aux **Éditions du Moniteur** - Case 61
20 rue des Aqueducs - CS 30568 94255 Gentilly Cedex

Titre	Réf.	Prix TTC	Qté	Total TTC
Maisons passives : Concevoir, construire et habiter	114829	64 €		
Je règle les				
<input type="radio"/> Frais d'envoi - France métropolitaine (livraison en Colissimo)				+1 €
<input type="radio"/> Frais d'envoi - Union Européenne : 8,90 € par article				+.....€
<input type="radio"/> Frais d'envoi - DOM TOM et reste du monde : 14,90 € par article				+.....€
W3088		TOTAL	€

M^{me} M. Prénom Nom

Entreprise/Organisme

Fonction Service

Adresse

Code postal [] [] [] [] [] Ville

Téléphone.....

Email

► Règlement par :

Chèque à l'ordre des **Éditions du Moniteur**

Signature et date obligatoires :

Paiement sécurisé par carte bancaire, commandez sur notre site
boutique.lemoniteur.fr

*Informations non contractuelles

Tarifs valables jusqu'au 31/03/2026 . Les informations à caractère personnel recueillies ci-dessus font l'objet d'un traitement par la société GROUPE MONITEUR afin de traiter et d'exécuter votre commande. Elles sont conservées dans un fichier informatique que GROUPE MONITEUR ou toute société du groupe Infopro Digital, dont GROUPE MONITEUR fait partie, pourra utiliser afin de vous envoyer des propositions utiles à votre activité professionnelle. Toute demande liée à l'exercice de vos droits d'accès, d'opposition, de suppression, de retrait du consentement doit être envoyée à l'adresse suivante : privacy-editions@infopro-digital.com. La politique en matière de données personnelles du groupe Infopro Digital est disponible à l'adresse : <https://www.infopro-digital.com/fr/protection-des-donnees/fr/>.
Acceptez-vous de recevoir des propositions utiles à votre activité professionnelle de la part de tiers ?
 Oui Non

