

Mémoire de fin d'études : "Le potentiel d'une solution biosourcée dans la transition énergétique en France : l'exemple de la fibre de bois."

Auteur : Ulrich, Jocelyn

Promoteur(s) : Possoz, Jean-Philippe

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

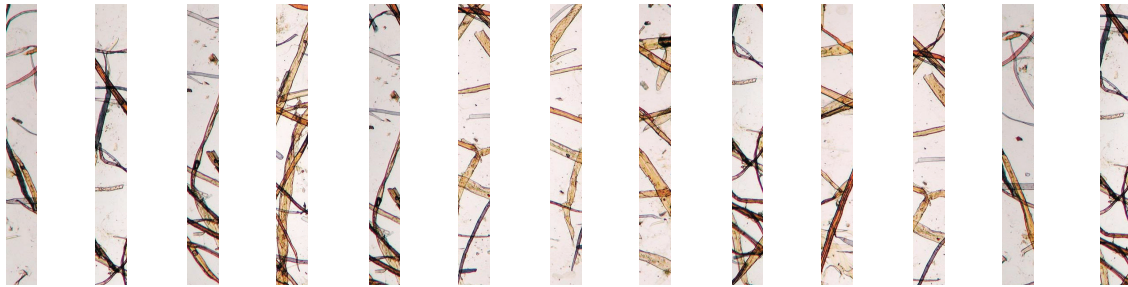
Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/6262>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



LE POTENTIEL D'UNE SOLUTION BIOSOURCÉE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE : **L'EXEMPLE DE LA FIBRE DE BOIS**

*Travail de fin d'études présenté par Jocelyn ULRICH en vue de
l'obtention du grade de Master en Architecture*

Sous la direction de : Jean-Philippe POSSOZ

Année académique 2018-2019

Axe de recherche : Haute Qualité Construite



UNIVERSITE DE LIEGE – FACULTE D’ARCHITECTURE

LE POTENTIEL D’UNE SOLUTION BIOSOURCEE DANS LA TRANSITION ENERGETIQUE EN FRANCE : L’EXEMPLE DE LA FIBRE DE BOIS

Travail de fin d’études présenté par Jocelyn ULRICH en vue de l’obtention du
grade de Master en Architecture

Sous la direction de : Jean-Philippe POSSOZ

Année académique 2018-2019

Axe de recherche : Haute Qualité Construite

Remerciements :

Je tiens à remercier toutes les personnes impliquées de près ou de loin dans la réalisation de ce travail et plus particulièrement Jean-Philippe Possoz, pour m'avoir guidé dans l'orientation de mes recherches.

Je remercie également les différentes personnes m'ayant accordé leur temps pour répondre à mes questions et réaliser les entretiens indispensables à la rédaction de ce travail.

Enfin je tiens à remercier ma famille et mes proches pour leur soutien tout au long de ma démarche et pour leurs relectures attentives.

SOMMAIRE :

■	Introduction.....	5
■	<i>Classification et délimitation des produits étudiés</i>	<i>8</i>
■	<u>PARTIE I : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES F-LDB.....</u>	9
■	1.1 Domaines d’application et caractéristiques générales.....	10
■	1.1.1 LDB : caractéristiques et domaines d’application.....	10
■	1.1.2 FDB : caractéristiques et domaines d’application.....	12
■	1.1.3 Les Procédés de fabrication des F-LDB.....	14
■	1.1.4 Composition des F-LDB.....	16
■	1.1.5 Impact sanitaire des F-LDB.....	18
■	Synthèse.....	19
■	1.2 Caractéristiques Physiques et techniques des L-FDB.....	20
■	1.2.1 Transfert de chaleur à l’intérieur des matériaux.....	20
■	1.2.2 Inertie thermique et temps de déphasage.....	23
■	1.2.3 L-FDB et hygrométrie.....	29
■	1.2.4 Réaction et comportement au feu.....	32
■	Synthèse.....	34
■	<u>PARTIE II : LA STRUCTURE DE LA FILIERE DES F-LDB.....</u>	35
■	2.1 L’Etat et les caractéristiques de la filière des F-LDB.....	36
■	2.1.1 La structure du marché de l’isolation en France.....	36
■	2.1.2 Les freins et opportunités de la filière biosourcée.....	38
■	2.1.3 La structure des acteurs de la production des F-LDB.....	40
■	2.1.4 Le rôle de la Recherche & Développement.....	44
■	Synthèse.....	48
■	2.2 F-LDB et culture constructive	49
■	2.2.1 L’appréhension du matériau par les acteurs	49
■	2.2.2 Les F-LDB, pour quels types de projets ?.....	53
■	2.2.3 Considérations sur les prix.....	55
■	Synthèse.....	57
■	2.3 Aspects Politiques, législatifs et labels	58
■	2.3.1 La politique publique dans le domaine de l’isolation	58
■	2.3.2 Les incitants publics.....	59
■	2.3.3 La réglementation thermique	60
■	2.3.4 Les labels affectant les F-LDB.....	61
■	Synthèse.....	63

■ PARTIE III : ANALYSE DES CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES

PROPRES AUX F-LDB.....	64
■ 3.1 Analyse de la disponibilité de la ressource	65
■ 3.1.1 Nature de la ressource forestière utilisée.....	65
■ 3.1.2 La ressource mobilisable à l'échelle nationale.....	68
■ 3.1.3 La ressource mobilisable à l'échelle régionale.....	70
■ 3.1.4 Limites liées à l'exploitation de la ressource.....	72
■ 3.1.5 Les labels FSC et PEFC.....	74
■ Synthèse.....	76
■ 3.2 Analyse du cycle ACV des F-LDB.....	77
■ 3.2.1 Méthodologie et paramètres de l'étude.....	77
■ 3.2.2 Analyse de l'énergie grise liée au matériau.....	80
■ 3.2.3 Analyse des autres impacts environnementaux.....	82
■ 3.2.4 Variations de l'ACV selon les scénarios.....	83
■ Synthèse.....	87
■ 3.3 Analyse comparative avec d'autres matériaux isolants.....	88
■ 3.3.1 Comparaison des bilans avec la base <i>Baubook</i>	88
■ 3.3.2 Comparaison des bilans avec La base <i>KBOB</i>	92
■ 3.3.3 Analyse comparative de parois types.....	95
■ Synthèse.....	101
■ Conclusion.....	102
■ Bibliographie.....	105
■ Tables.....	108

INTRODUCTION

Le problème actuel posé par l'épuisement des ressources énergétiques fossiles engendrera une montée inéluctable de leurs prix, parallèlement aux conséquences environnementales inhérentes à l'utilisation de plusieurs d'entre elles. Le recours à de telles énergies pour satisfaire les besoins humains reste toutefois prépondérant et en constante augmentation : pétrole, gaz naturel, charbon et nucléaire, cumulant près de 85% de la production énergétique mondiale en 2017 selon le GIEC. Malgré quelques résistances, la communauté scientifique internationale s'accorde pourtant très majoritairement, avec néanmoins des degrés d'appréciation variables, sur l'urgence d'une transition énergétique et écologique à une échelle globale. Des solutions énergétiques alternatives plus localisées tendent donc à se développer de moins en moins en qualité d'option, mais comme nécessité au regard de la crise socio-environnementale actuelle.

En France, selon l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), plus de 40% de l'énergie finale totale du pays est consommée par le secteur du bâtiment, dont 60% uniquement pour le chauffage. Ce secteur est également responsable de 30% du poids des déchets et de près de 25% des émissions de gaz à effet de serre selon l'ADEME. Ces proportions importantes, combinées à l'échelle pluri-décennale dans laquelle peut s'inscrire la durée de vie d'un bâtiment, font de ce secteur un acteur de premier plan dans cette transition. L'isolation joue un rôle central dans cette problématique, vu les objectifs ambitieux fixés par les pouvoirs publics desquels découle une réglementation énergétique toujours plus stricte, mais aussi dans la rénovation nécessaire d'un parc immobilier majoritairement construit avant les années 1970 et, donc, n'intégrant pas les préoccupations environnementales actuelles.

Cependant, une transition efficace énergétique au sein du bâtiment ne peut faire l'économie des considérations environnementales et des critères de durabilité des systèmes constructifs qu'elle souhaite mettre en place, afin de s'inscrire non plus dans une transition énergétique mais dans une transition écologique intégrant ces paramètres

Actuellement, les filières de matériaux d'isolation biosourcés, c'est-à-dire renouvelables car issus de la biomasse animale et végétale, se développent en France et semblent offrir des avantages en terme de durabilité par rapport aux solutions d'isolation conventionnelles. Elles sont cependant soumises à plusieurs freins, principalement liés au manque de structuration de leur tissu industriel, de la disponibilité de leurs ressources et de la considération des acteurs du bâtiment, les cantonnant à un emploi encore marginal. Après la prise de conscience, par le secteur de la construction et de l'énergie, du problème environnemental, aboutissant à la mise en place de solutions techniques plus ou moins efficaces pour y répondre, se pose maintenant la question de leur emploi à une échelle significative, leur permettant d'atteindre la masse critique d'utilisation nécessaire à une transition écologique efficace.

Les isolants en fibre de bois présentent à ce titre plusieurs caractéristiques intéressantes. Premièrement, les fibres de bois font partie des solutions biosourcées actuellement les plus employées à l'échelle française, avec 5 sites industriels implantés sur le territoire, même si de fortes importations depuis les voisins européens subsistent. Ensuite, l'importante gamme de produits proposés par les fabricants permet de répondre à un grand nombre d'applications au sein du bâtiment. Enfin, l'entièreté du processus caractérisant le cycle de vie du matériau, du prélèvement de la ressource naturelle à sa fin de vie, est présente dans l'hexagone, ce qui en fait une ressource relativement territorialisée. Au premier abord, ces caractéristiques lui confèrent un rôle important dans la transition écologique et énergétique du bâtiment en France, même si son emploi reste largement minoritaire par rapport à l'ensemble des solutions isolantes.

Ce travail de recherche tentera d'évaluer la pertinence de l'utilisation de cette solution isolante dans la transition écologique, mais aussi d'en esquisser son potentiel actuel et futur à travers différents champs de recherche. Cette problématique peut donc se décliner sous la forme des 2 questions suivantes auquel ce travail tentera d'apporter des éléments de réponse :

- *Quel est la pertinence de l'utilisation de cette solution isolante par rapport à ses homologues d'un point de vue technique et du développement durable ?*
- *Quels sont les freins et les opportunités auxquels la filière est confrontée et affectant son potentiel futur ?*

Apporter des éléments de réponses à ces questions nécessite une approche transversale et pluridisciplinaire. En effet, l'analyse du potentiel et de la pertinence de l'utilisation d'un matériau ne peut se résumer à ses caractéristiques techniques, environnementales ou bien socio-économiques mais doit intégrer ces 3 aspects et leurs interactions.

La première question sera traitée par une analyse technique et environnementale du matériau dont les résultats seront confrontés à ceux des autres solutions isolantes couramment utilisées. Nous classerons habituellement les isolants en trois catégories : synthétiques, minéraux et biosourcés. L'analyse du potentiel d'un matériau et de sa filière à l'échelle du territoire français peut être évaluée, même si cette approche reste incomplète, par l'étude de leurs caractéristiques à travers le spectre des trois piliers du développement durable : économique, social et environnemental. L'examen des freins et opportunités rencontrés par la filière, l'appréhension de ce matériau par le monde de la construction, ainsi que la gestion et la disponibilité à long terme des ressources nécessaires à sa fabrication à l'échelle nationale, sont autant d'éléments déterminants, trouvant leurs causes et leurs effets dans plusieurs disciplines, ce qui nous permettra d'en évaluer le potentiel actuel et à venir.

Ce travail ne tentera donc pas d'établir des scénarios ou des projections de la situation future de la filière produisant ce matériau mais d'en déterminer les caractéristiques, afin d'en esquisser les possibilités futures. Pour ce faire, le travail sera divisé en trois parties.

Dans un premier temps, nous examinerons les caractéristiques matérielles et techniques du matériau afin d'en extraire les points forts et les faiblesses liés à sa mise en œuvre et à ses performances et, donc, d'évaluer la pertinence de son usage par rapport aux autres procédés d'isolation. Elle permettra d'établir une première approche de caractéristiques comme le procédé de fabrication ou la composition des matériaux, qu'il reste important de considérer en raison des influences qu'elles auront sur les autres domaines, même si elles ne permettent pas de répondre directement à la problématique de ce travail.

Une seconde partie s'attachera à l'analyse des aspects économiques de la filière afin d'identifier la nature des freins et des opportunités qu'elle peut rencontrer, et d'évaluer dans quelle mesure elle s'inscrit dans un schéma durable ou non. L'aspect traitant de sa durabilité au niveau social sera abordé sous l'angle de la relation que les isolants en fibre de bois entretiennent avec la culture constructive du pays, en y incluant les aspects politiques et législatifs, mais aussi par l'appréhension du matériau et de sa filière par les acteurs du bâtiment concernés. Ce dernier point sera réalisé à l'aide d'une série d'entretiens semi-directifs, manuscrits ou par téléphone (consultables en annexes 1 à 6), avec divers acteurs du bâtiment jouant un rôle dans la prise de décision ou dans la mise en œuvre du matériau. Ces entretiens permettront, par ailleurs, de vérifier et de nuancer des aspects théoriques présents dans les différentes parties de ce mémoire.

Enfin, les isolants biosourcés ont pour première caractéristique, aussi bien dans l'imaginaire collectif que dans la communication faite par les fabricants, de ne présenter qu'un très faible impact environnemental.

Une troisième partie s'attachera à vérifier et à nuancer cette affirmation à travers trois champs d'analyse : la disponibilité de la ressource utilisée à l'échelle nationale, l'impact environnemental de chacune des étapes du cycle de vie du matériau puis un exercice comparatif des informations mises à disposition par les fabricants et les diverses bases de données traitant de la question de l'énergie grise et du bilan CO₂. Cette analyse comparative permettra de mesurer les écarts de l'impact environnemental des fibres de bois avec celui de solutions isolantes utilisées couramment et donc d'en estimer la viabilité sur le plan du développement durable.

CLASSIFICATION ET DÉLIMITATION DES PRODUITS ÉTUDIÉS

La laine de bois et la fibre de bois sont deux isolants thermiques et acoustiques, tous deux extraits des mêmes résidus issus du bois. Plusieurs classifications de ces matériaux selon leur rigidité, leur masse volumique, leur emploi ou encore leurs procédés de fabrication, existent. Nous retiendrons celles classant les matériaux en deux catégories, même si un nombre important de produits intermédiaires peut rentrer dans les deux classifications :

- *Les panneaux en laine de bois souples que nous dénommerons sous le sigle LDB, issus d'un procédé de fabrication à sec, habituellement encastrés dans un support à ossature et dont la masse volumique se situe entre 35 kg/m³ et 70 kg/m³*
- *Les panneaux de fibre de bois rigides que nous dénommerons sous le sigle FDB, issus du procédé de fabrication humide, destinés majoritairement à une utilisation sur surface continue en ITI pour une masse volumique comprise entre 120 kg/m³ et 240 kg/m³.*

Le sigle F-LDB sert d'abréviation pour désigner communément les deux matériaux.

La fibre de bois est employée dans un grand nombre de produits isolants remplissant des fonctions différentes. Afin de délimiter le sujet et de se focaliser sur la gamme de matériaux prépondérante sur le marché, le TFE ne traitera pas des isolants en fibre de bois en vrac, des isolants acoustiques ainsi que des isolants issus d'un mélange entre fibre de bois et un autre matériau (laine de verre, ciment, matières synthétiques).

PARTIE I

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES F-LDB

L'objectif de cette partie est de déterminer quelles sont les qualités et les défauts potentiels inhérents aux L-FDB en tant que matériaux de construction, en distinguant les spécificités des LDB et FDB. Elle est basée à la fois sur une documentation théorique issue de divers ouvrages traitant des sciences des matériaux, incluant la documentation des fabricants et des entretiens réalisés. Cette partie s'attachera, dans un premier temps, à analyser les critères liés aux aspects de production et de la mise en œuvre du matériau : domaines d'application, techniques de mise en œuvre spécifiques, processus de fabrication et impact sanitaire.

Dans un second temps, les aspects propres aux sciences des matériaux seront évoqués : caractéristiques mécaniques, conductivité thermique, inertie thermique, hygrométrie ainsi que le comportement et la résistance au feu. L'objectif étant d'évaluer les performances et les aspects spécifiques des F-LDB, comparativement à celles d'autres produits isolants.

1.1 DOMAINES D'APPLICATION ET CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

1.1.1 LDB : CARACTÉRISTIQUES ET DOMAINES D'APPLICATION

1.1.1.1 Caractéristiques principales :

Masse volumique ρ [kg/m ³]	35 à 70
Conductivité thermique λ [W/m.K]	0,036 à 0,042
Chaleur spécifique c [kg/m ³]	1600 à 2300
Résistance à la diffusion de vapeur μ	1 à 2
Euroclasse de réaction au feu	E
Qualité de l'air intérieur	A ou A+



Tableau 1 : Caractéristiques générales des LDB d'après le CSTB

Illustration 1 : matelas de LDB Flex 55

1.1.1.2 Domaines d'application :

L'isolation rapportée en LDB occupent des postes similaires à ceux d'autres isolants semi-rigides biosourcés ou minéraux conditionnés sous forme de matelas. La gamme étendue de produits, dont l'épaisseur varie habituellement entre 40 mm et 240 mm, permet une utilisation aussi bien en application murale, qu'en plancher ou en toiture, en ITI comme en ITE, dans la construction neuve comme dans la rénovation et sur tout type de support porteur lisse.¹ Leur flexibilité induit dans la plupart des cas une pose par simple encastrement dans une ossature primaire ou secondaire, généralement en bois, rigide et aux sections rectangulaires. Les LDB sont donc inadaptées pour les ossatures de sections irrégulières comme, par exemple, certains combles ou des sections en « I » où une isolation en vrac ou projetée sera plus adéquate. Il est possible de disposer plusieurs épaisseurs de panneaux dans une ossature à condition que les joints soient décalés afin de minimiser les ponts thermiques.

Une pose en continu par fixation à l'aide de chevilles reste néanmoins possible à condition que les LDB soient suffisamment souples pour qu'il n'y ait aucun interstice entre les matelas. Un léger surdimensionnement de 5 mm à 10 mm sur la largeur des matelas est par ailleurs souhaité lors de leur mise en œuvre, afin qu'ils puissent s'encastrer sans occasionner de lame d'air dans l'interface avec les montants.¹ Notons que, dans le cadre d'une pose en ITI, l'étanchéité à l'air du parement intérieur doit être assurée par la pose d'un écran frein-vapeur dans la plupart des cas afin de minimiser les transferts de vapeur d'eau. Les panneaux étant particulièrement sensibles à l'humidité, il reste nécessaire de protéger les matelas des intempéries durant le chantier lorsque la pose s'effectue en ITE et de s'assurer que les locaux soient ventilés et les éléments de maçonnerie secs, dans le cas d'une pose en ITI sur ce type de support.² Les LDB sont également inadaptées dans le cas de parois à l'humidité persistante comme dans certaines caves, des pieds de mur pouvant subir des remontées d'eau par capillarité ou bien à proximité de sources de chaleur comme les conduits de cheminée ou les spots encastrés.²

¹ Prescriptions de mise en œuvre Steico flex – STEICO SE, Brumath, 2016 – p. 3 à 6

² V. GALMICHE – Isolants biosourcés : points de vigilance – AQC, Paris, 2016 – p. 34 à 37

1.1.1.3 Application murale :

Une application murale nécessite des matelas de LDB à la densité plus élevée que ceux disposés dans un plancher ou en toiture pour éviter les effets de tassements engendrant des ponts thermiques. Les matelas viennent généralement s'insérer entre les montants, une fois l'ossature contreventée, sans nécessiter de fixation spécifique. Dans le cas d'une ossature secondaire, sur tout type de support porteur, les LDB sont classiquement posées en ITI (Isolation Thermique Intérieure) dans une cloison de doublage mais peuvent être également mises en œuvre dans une ossature secondaire en ITE (Isolation Thermique Extérieure). Dans les deux cas, si la configuration constructive le permet, les LDB peuvent être posées en continu via une fixation, par chevilles, agrafes ou fourrures directement au support, à la condition que la jonction entre les panneaux n'occasionne pas de lame d'air. Cette pose reste, néanmoins, techniquement plus complexe. Dans le cas d'une pose par encastrement dans une ossature, une lisse intermédiaire devra être mise en place pour des hauteurs de parois excédant 250 cm ou 300 cm afin d'empêcher les effets de tassement.³

1.1.1.4 Application en plancher :

Les laines de bois souples peuvent s'appliquer dans tout type d'ossature de plancher (solives, lambourdes...) à condition que cette dernière possède un sous plancher rigide et autoportant. En effet, le matériau étant fortement compressible, il s'avère impossible d'envisager une pose continue sur tout type de plancher destiné à recevoir une charge utile, contrairement aux FDB. Les panneaux LDB posés horizontalement ne subissant pas d'effet de tassement, il est possible d'utiliser, dans les ossatures de plancher, des matelas aux densités les plus faibles et donc au pouvoir isolant le plus fort.

1.1.1.5 Application en toiture :

L'application en toiture inclinée des LDB reste similaire à une application murale, les matelas pouvant être positionnés entre les éléments d'ossatures ou bien maintenus à l'aide de fourrures. Un doublage de la première couche par un contre-chevonnage ou fourrure métallique perpendiculaire peut être envisagé pour obtenir une rupture des ponts thermiques.⁴

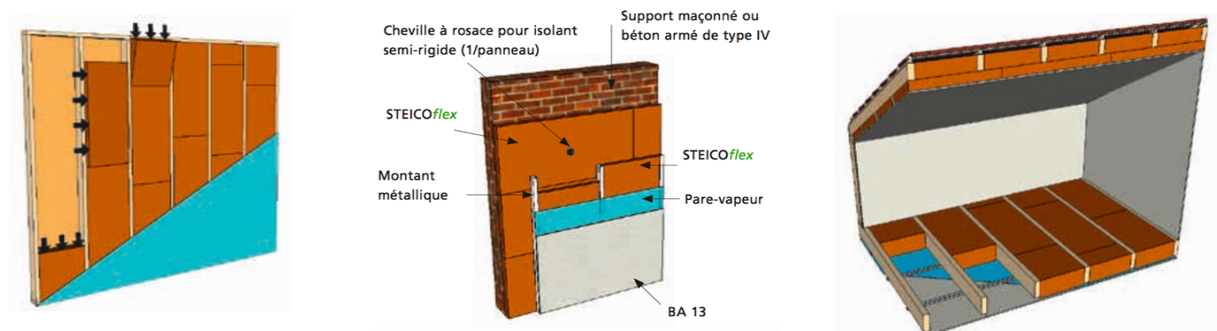


Illustration 2 : Procédés de pose de la LDB Steico Flex, entre ossature (à gauche), en doublage ITE (au centre) et en plancher

³ Prescriptions de mise en œuvre Steico flex – STEICO SE, Brumath, 2016 – p. 4 à 9

⁴ Mise en œuvre des produits Pavatex – PAVATEX SA, Fribourg, 2014 – p. 10

1.1.2.1 Caractéristiques principales :

Masse volumique ρ [kg/m ³]	120 à 240
Conductivité thermique λ [W/m.K]	0,038 à 0,055
Chaleur spécifique c [kg/m ³]	1600 à 2300
Résistance à la diffusion de vapeur μ	3 à 5
Euroclasse de réaction au feu	E
Qualité de l'air intérieur	A ou A+

Tableau 2 : Caractéristiques générales des FDB d'après le CSTB



Illustration 3 : panneau de FDB Steico Universal

1.1.2.2 Domaines d'application :

Les panneaux FDB rigides, d'une épaisseur variant entre 25 mm et 140 mm occupent des postes similaires à ceux d'autres isolants rigides synthétiques (XPS, EPS, PUR) ou minéraux (verre cellulaire, mousses minérales). Ces panneaux peuvent être employés en application murale, en plancher et en toiture aussi bien dans le cadre de la construction neuve qu'en rénovation, préférentiellement en ITE, sauf dans le cas des planchers. Ces panneaux sont habituellement dotés de bords bouvetés permettant leur assemblage pour une pose en continu et fixés au support par chevilles ou agrafes. Il est également possible de prévoir une pose par collage au support si celui-ci est lisse et continu. Leur pose peut s'effectuer directement sur une ossature bois si leur rigidité le permet, mais peut nécessiter un support continu en cas d'épaisseur inférieure pour les panneaux les moins denses.⁵

Leur pose s'avère généralement plus technique et onéreuse que celle des LDB. Une application dans une ossature secondaire (chevrons, lambourdes, rails métalliques) reste possible avec les matériaux ayant les bordures adéquates.⁶ Étant généralement utilisés en ITE, certains produits aux densités les plus élevées peuvent être temporairement étanches à l'eau et au vent pour une période pouvant aller jusqu'à 12 semaines.⁷ Étant donné le caractère spécifique et les fonctionnalités différentes offertes par chaque produit, il est nécessaire de porter une attention particulière dans le choix du panneau par rapport aux configurations du poste pour lequel il est prévu.

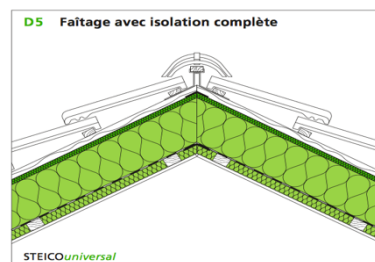
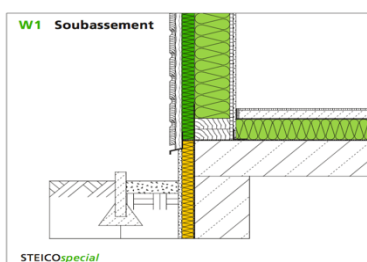


Illustration 4 : Procédé de mise en œuvre des FDB en ITE murale (à gauche), en pare-pluie pour toiture (au centre) et en système à lambourdes intégrées (à droite)

⁵ Prescription de mise en œuvre des panneaux support d'enduit pour ITE – STEICO SE, Brumath, 2016 – p. 2 à 6

⁶ Mise en œuvre des produits Pavatex – PAVATEX SA, Fribourg, 2014 – p. 39

⁷ Prescriptions de mise en œuvre des panneaux pare-pluie – STEICO SE, Brumath, 2016 – p. 3

1.1.2.3 Application murale :

Dans le cadre d'une fixation murale en ITE, les panneaux sont idéalement posés horizontalement avec un décalage des joints verticaux d'un minimum de 30 cm et un harpage au droit des angles. Le nombre de points d'attache peut varier de 5 à 9 par panneau sur au moins deux montants différents. Les joints d'une épaisseur de plus de 5 mm devront être bouchés avec un mastic ou un produit naturel. Afin de protéger les FDB de l'humidité au niveau des soubassements, une garde au sol de 15 à 30 cm comprenant une solution d'isolation spécifique doit être envisagée.⁸ Dans le cas d'une ossature bois, ces panneaux rigides offrent un complément intéressant à l'isolation entre montants dans la minimisation des ponts thermiques dus à la structure. Si le contreventement de l'ossature bois s'effectue côté intérieur et que l'isolant entre montants est rigide ou semi-rigide, il n'est pas nécessaire de disposer d'interfaces supplémentaires entre les montants et l'isolation rigide extérieure si la configuration constructive le permet. Certains panneaux comportent également une face permettant l'accrochage d'un enduit extérieur.

1.1.2.4 Application en plancher :

La résistance à la compression du matériau lui permet d'être posé en plancher, en phase tardive de chantier lorsque l'humidité de la construction sera plus faible. Des systèmes intégrés entre lambourdes permettent de conserver une grande stabilité dimensionnelle tout en maintenant la possibilité d'y fixer un sous-plancher. Dans le cas d'un plancher flottant ou d'une isolation sous chape, il est également possible d'utiliser des FDB incompressibles en surface continue.⁹

1.1.2.5 Application en toiture :

La gamme des FDB disponible pour un usage en toiture est la plus variée.

Les panneaux pare-pluie peuvent assumer une fonction protectrice variable selon qu'ils soient hydrofugés dans la masse ou bien superficiellement, pouvant aller jusqu'à 12 semaines si une lame d'air ventilé en phase interne est préservée.¹⁰ Il est pour cela nécessaire de respecter le sens de pose et les précautions supplémentaires à la pose murale, surtout dans le domaine de l'étanchéité à l'eau et de la résistance mécanique. La rigidité de certains panneaux FDB leur permet d'être utilisées dans une pose en sarking, c'est à dire une ITE en toiture où l'isolant peut assumer la charge des éléments de couverture finaux. Il est recommandé de disposer plusieurs couches afin d'avoir un panneau pare-pluie le plus fin possible, ce dernier ayant une énergie grise et un prix sensiblement plus élevés. La pose peut être continue pour l'isolation d'une toiture chaude, même avec les FDB de faible densité. Cependant, il n'existe actuellement aucune solution, commercialisée par les fabricants courants, de panneaux à pente intégrée.

⁸ Prescription de mise en œuvre des panneaux support d'enduit pour ITE – STEICO SE, Brumath, 2016 – p. 12 à 24

⁹ Mise en œuvre des produits Pavatex – PAVATEX SA, Fribourg, 2014 – p. 43 à 47

¹⁰ Prescriptions de mise en œuvre des panneaux pare-pluie – STEICO SE, Brumath, 2016 – p. 3

¹¹ Mise en œuvre des produits Pavatex – PAVATEX SA, Fribourg, 2014 – p. 12

Le matériau est couramment fabriqué à l'aide de deux procédés ayant des conséquences environnementales et utilisant des produits de natures bien distinctes. Certains produits intermédiaires peuvent être réalisés selon les deux types de procédés ou connaître un procédé différent, mais Les LDB restent très majoritairement issues du processus sec et les FDB, du processus humide. La description des deux procédés suivants sont ceux du groupe PAVATEX.

1.1.3.1 Le processus sec :

Ce procédé, moins énergivore, tend à prendre le pas sur le procédé humide des FDB. Les plaquettes, sont, dans un premier temps, triées par un tamisage permettant de retirer celles étant surdimensionnées, les poussières ou les intrus comme les métaux ou plastiques. Elles sont ensuite successivement déversées dans un pré-cuiseur sans pression, ce qui permet de diminuer leur degré d'humidité, puis étuvées dans un cuiseur afin de chauffer et attendrir les fibres sous une pression allant de 4 à 6 bars. Elles sont ensuite défibrées, par passage des plaquettes entre deux disques en métal (un rotor et un stator) afin d'obtenir une fibre calibrée entre 2 et 12 cm de longueur et n'excédant pas 7 mm d'épaisseur. Cette étape sera déterminante dans les caractéristiques des futurs panneaux. En effet, des fibres fines diminuent les transmissions par conduction. Les fibres sont ensuite mélangées, à une température de 80 à 90°C, aux additifs et aux liants synthétiques en vue d'obtenir la polymérisation de ces derniers, c'est à dire leur fonte et leur fixation aux fibres. Le type de mélangeur employé dépend alors du type de liant utilisé, du pourcentage de chaque constituant du mélange et du caractère ségrégatif des composants.¹²

Le mélange est ensuite réparti sur un tapis pour la phase de pressage, étape déterminant le profil de densité et l'orientation des fibres dans les futurs panneaux. Les bords des panneaux sont découpés car ne subissent pas la même pression qu'au centre et peuvent être directement réinjectés dans le processus, la polymérisation n'étant pas achevée avant le pressage final.¹²

Une fois le pressage effectué, vient l'étape dite de relaxation, où la force de presse diminue progressivement dans un cycle de pression-dépression destiné à renforcer l'élasticité du matériau jusqu'à obtenir la densité souhaitée. Les panneaux sont ensuite séchés à 120 °C afin d'achever la polymérisation. Une fois refroidis, vient le découpage aux dimensions souhaitées puis le stockage et l'emballage des produits.¹²

¹² T. THOMAS – *Projet ATI 2 PAVATEX : Optimisation du mélangeur et de la presse de la ligne pilote* – Université de Lorraine, 2016 – p. 63 à 64

1.1.3.2 Le procédé humide :

Les étapes de triage, étuvage et défibrage sont les mêmes que dans le procédé sec.

Les fibres sont ensuite mélangées à l'eau et aux additifs éventuels (retardateur de flamme, paraffine, latex...). La solution est ensuite essorée pour devenir une pâte et disposée sur la chaîne de pressage. C'est ici que la compacité du futur panneau sera déterminée. Le liquide récupéré dans ces deux phases étant ré-injectable dans la solution du cycle suivant. Un premier calibrage des panneaux sera effectué à cette étape.¹³

Cette pâte est ensuite séchée à une température allant de 140° à 200° pour atteindre un taux d'humidité de 6 %. C'est durant cette étape alliant chaleur et vapeur d'eau que la réaction entre la lignine et l'hémicellulose présentes dans les fibres donnera sa cohérence au panneau. Plus les fibres sont fines, plus leur surface de contact extérieure sera élevée et augmentera le dégagement de lignine, ce qui renforcera la cohésion du futur panneau. Après séchage, celui-ci est découpé aux dimensions souhaitées avec les éventuels systèmes de finitions bouvetées nécessaires. Ces plaques, de l'ordre de 20 mm d'épaisseur peuvent également être assemblées par collage pour former l'épaisseur du panneau final avant d'être emballées et stockées.¹³

1.1.3.3 Avantages et inconvénients des deux procédés :

Le procédé sec présente l'avantage de pouvoir compacter les panneaux directement dans leur épaisseur finale (jusqu'à 240 mm) contrairement au collage de plusieurs épaisseurs généralement nécessaires au processus humide. On a également une absence du problème de la gestion des eaux usées lié au procédé. Il présente cependant l'inconvénient d'avoir recours aux liants polymères pouvant contenir des teneurs variables de formaldéhyde, nocif au niveau sanitaire et compromettant la gestion de la fin de vie du matériau.

Cependant, outre les températures de chauffages plus élevées, les FDB, plus denses, nécessitent plus de fibres. Or, le défibrage peut représenter 30% des besoins énergétiques du procédé, ce qui, à performance thermique égale, rend plus énergivore le processus de fabrication des FDB, comme nous le verrons en partie III.¹⁴ Les deux procédés présentent l'avantage de pouvoir réintégrer la totalité des chutes de découpes, que celles-ci soient réinjectées en tant que matière première si leur chauffage/polymérisation n'a pas encore été effectué ou bien revalorisées en tant qu'énergie de procédé par combustion, s'il s'agit de chutes issues du produit fini.

¹³ Annexe 10 : DEP : Panneaux isolants en fibres de bois – PAVATEX SA, Institut Bauen und Umwelt, Fribourg, 2010 – p. 7

¹⁴ DEP : Isolants en fibres de bois – STEICO SA, Institut Bauen und Umwelt, Berlin, 2016 – p. 8

1.1.4 COMPOSITION DES F-LDB

La composition des F-LDB est décrite avec précision dans les DEP (Déclaration Environnementales de Produits) émises par les fabricants STEICO et PAVATEX et vérifiées par un organisme agréé par le CSTB (Centre Scientifique des Techniques du Bâtiment). Bien que d'importantes variables de composition soient observables, une mutualisation des informations issues de ces DEP et des fiches techniques nous offre un aperçu de la composition des produits.

1.1.4.1 Les éléments de base :

Pour être classé en tant que tel, un isolant en F-LDB doit avoir une masse étant composée d'au moins 80% de fibres de bois provenant de bois résineux, généralement l'épicéa, le sapin, le pin sylvestre, le douglas, le pin maritime et le mélèze. Ces fibres représentent donc, selon la densité progressive des matériaux, entre 80% et 95% de la masse des LDB.^{14 et 15} Dans les FDB, elles représentent entre 92% et 97,5% de la masse des produits.¹⁶ Elles sont soit prélevées directement en forêt, soit issues de PCS (Produits Connexes de Scierie). Les fabricants utilisent dans des proportions variables ce mix de ressources disponibles comme nous le verrons dans la Partie III. Ces fibres contiennent environ 6% d'humidité à la sortie d'usine. Certains produits peuvent aussi contenir de la ouate de cellulose dans des quantités limitées de 5% à 6%.¹⁷

Enfin, certains fabricants proposent des mélanges entre LDB et d'autres produits de nature différente afin de profiter des avantages de chacun d'entre eux. Par exemple, ISOVER propose un produit mixant 50% de laine de bois (minimum requis pour que le produit garde son attribution d'isolant biosourcé) et 50% de laine de verre.¹⁸ Cette association permet, selon le fabricant, de réduire significativement la quantité de liant nécessaire, le mélange de ces deux fibres garantissant leur cohésion pour des densités faibles et donc une performance thermique parmi les plus élevées pour les isolants biosourcés de $\lambda = 0,036 \text{ W/m.K}$.

1.1.4.2 Les liants :

En processus sec pour les LDB :

Le procédé de fabrication à sec des LDB impose généralement le recours à des liants, polymères dans des proportions allant de 4% à 15% de la masse du panneau, la cohésion des fibres n'étant pas assurée par la réaction entre la lignine et la cellulose des fibres.¹⁹

¹⁴ DEP : isolation en fibre de bois Pavaflex – PAVATEX SA, Institut Bauen und Umwelt, Berlin, 2016 – p. 5

¹⁵ Prescriptions de mise en œuvre Steico flex – STEICO SE, Brumath, 2016 – p.6

¹⁶ Annexe 10 : DEP : Panneaux isolants en fibres de bois – PAVATEX SA, Institut B. U, Fribourg, 2010 – p. 6

¹⁷ DEP : Isolants en fibres de bois – STEICO SA, Institut Bauen und Umwelt, Berlin, 2016 – p. 3

¹⁸ Isoduo 36 : l'alliance de la fibre de bois et de la laine de verre – ISONAT, Suresnes – p 2 à 3.

¹⁹ Site internet – Produit Flex 40, ISONAT – Disponible sur : <https://www.isonat.com/actualites/isonat-flex-40-lisolant-bio-source-le-plus-economique-du-marche>

Il existe 4 types de liants polymères entrant dans la composition courante des LDB : le PMDI (Polymeric Methylene Diphenylene Isocyanate) et le polyuréthane présentant une bonne adhésion chimique, ne contenant pas de formaldéhyde mais ayant un prix élevé, les résines PF (Phénol-Formaldéhyde) très résistantes à la chaleur, à dégagement de formaldéhyde modéré, puis les Résines UF (Urée-Formaldéhyde), bon marché, mais présentant un dégagement de formaldéhyde élevé.²⁰ Le pourcentage d'intégration est variable selon la densité finale du panneau : moins il est dense, plus la masse de ce liant par rapport à sa masse totale, sera élevée. Des liants naturels comme l'amidon de maïs existent mais les fabricants se montrent souvent réticents à leur emploi. HOMATHERM proposait cependant un isolant en laine de bois au liant d'amidon végétal mais dont le prix restait 25% plus cher que ceux de sa gamme liée au PMDI.²¹

En processus humide pour les FDB :

Le processus humide a l'avantage de ne pas requérir de liants synthétiques. La lignine du bois présente naturellement dans les fibres se libère sous l'effet de la chaleur et donne sa cohérence aux panneaux. Cependant, ce processus limitant l'épaisseur des couches finales à 20 mm ou 30 mm, une colle blanche à bois doit y être ajoutée pour obtenir une épaisseur plus grande par contre-collage, pouvant représenter 0,5% à 3,5% de la masse du mélange.¹⁶

1.1.4.3 Les retardateurs de flammes :

Les F-LDB possédant une mauvaise réaction au feu, des additifs comme des sels de bore, du sulfates d'aluminium ou bien du phosphate d'ammonium doivent y être ajoutés. Les sels de bores présentent les avantages supplémentaires d'être anti-xylophages et anti-fongicides, ce qui permet de traiter trois problèmes propres au bois avec un seul produit. Leur masse est comprise entre 1% et 2,4% de la masse totale des F-LDB.¹⁷

1.1.4.4 Les rétenteurs d'eau :

De la paraffine à hauteur de 1% ou 2% afin de limiter la sensibilité des fibres à la vapeur d'eau est généralement injectée dans les F-LDB. Concernant les panneaux rigides pare-pluie, une pellicule de latex représentant 2% à 5% de la masse du panneau, peut être ajoutée en leur face extérieure pour permettre l'imperméabilité à l'eau durant la phase de chantier.¹⁶ Enfin, certains panneaux rigides pare-pluie peuvent contenir en surface, ou être imprégnés d'une émulsion de 10% de bitume pour une utilisation en sous-toiture temporairement étanche à l'eau.²²

²⁰ T. THOMAS – *Projet ATI 2 PAVATEX : Optimisation du mélangeur et de la presse de la ligne pilote* – Université de Lorraine, 2016 – p. 10 et 11

²¹ Site internet – *Produit Holz Flex, HOMATHERM* – Disponible sur : http://www.ecobouw.be/homatherm/download/Anwendungsbroschuere_FR.pdf

²² *Steico Phaltex : Panneau résilient thermo acoustique* – STEICO SE, Brumath, 2016 – p. 1

1.1.5 IMPACT SANITAIRE DES LDB ET FDB

Le formaldéhyde dégagé durant le processus de polymérisation lors de la fabrication présente un caractère irritant pour les voies respiratoires et est classé « *substance cancérogène avérée pour l'homme* » selon le CIRC (Centre International de Recherches sur le Cancer). Les FDES et DEP émises par les fabricants précisent, quant à elles, que le processus de fabrication ne présente aucun risque particulier pour les employés et n'est donc soumis qu'à la législation minimum encadrant les sites de production industriels.

Les phases de découpe sur chantier, semblent être celles présentant le risque sanitaire le plus important. En effet, les poussières issues des liants polymères, émettent des composés organiques volatiles comme les aldéhydes et les amines, toxiques pour l'homme, mais dont l'impact reste encore difficilement évaluable selon l'EPA (Environmental Protection Agency).²³ L'entretien réalisé avec H. PINCE révèle que les poussières émises lors de la découpe des F-LDB, peuvent être importantes, mais s'avèrent bien moins nocives que celles émises par les laines minérales : « *Même si les LDB peuvent dégager beaucoup de poussières durant les phases de découpe, celles-ci sont trop épaisses pour pénétrer les pores de la peau et les bronches, contrairement à celles des laines minérales. En plus des irritations, je pense que cela pourrait avoir des conséquences à retardement plus graves, un peu comme le scandale sanitaire avec l'amiante.* »²⁴

Un autre problème soulevé durant les entretiens est le poids important des panneaux durant leur manutention, certains panneaux FDB pouvant atteindre les 30 kg. L'air contenu dans les isolants est néanmoins certifié A ou A+ dans l'ensemble des FDES et pour l'ensemble des produits.

Dans l'état actuel des connaissances, le matériau ne présente cependant aucun risque particulier avéré si les conditions minimums de protection (masque, gants) et les outils de découpe adéquats (scie égoïne adaptée ou scie électrique) sont respectés conformément aux prescriptions de mise en œuvre émises par les fabricants.

²³ Site internet – *Cancer environnement* – Disponible sur : <http://www.cancer-environnement.fr/525-Acetaldehyde.ce.aspx>

²⁴ Annexe 1 : Entretien réalisé avec l'artisan poseur Henry PINCE

Selon la communication faite par les fabricants et les entretiens, Les F-LDB présentent l'avantage, lié à la diversité de la gamme des produits proposés, d'être employées dans un très grand nombre de postes d'isolation et d'offrir une bonne complémentarité, surtout dans le cas d'une utilisation dans une ossature bois. Par ailleurs, la mise en œuvre des LDB, lorsqu'elle s'effectue par simple encastrement dans une ossature, ne pose pas de difficultés particulières et reste semblable à celles de ses homologues végétaux. Leur flexibilité permet également un réemploi aisé des chutes de chantier par simple juxtaposition moyennant un léger compactage. Les FDB, par leur grande résistance à la compression, leur façonnage bouveté et les faibles épaisseurs disponibles, sont parmi les seuls isolants biosourcés à pouvoir occuper certaines fonctions spécifiques comme la pose en sarking en toiture, ou bien celle d'isolant incompressible en plancher. Leur mise en œuvre, similaire à celle des isolants synthétiques et minéraux rigides, requiert néanmoins un degré de technicité supplémentaire, aussi bien dans le calepinage que dans la fixation des panneaux.

Les deux procédés de fabrication majoritairement utilisés sont présent sur le sol français. Le procédé humide, de moins en moins utilisé, permet d'obtenir des FDB dont la composition est plus respectueuse de l'environnement, n'intégrant comme additif que les produits nécessaires à la mise en conformité du matériau et de la colle blanche lorsqu'il y a cumul des épaisseurs. Sa fabrication est cependant parmi les plus énergivores des solutions isolantes comme nous le verrons dans la Partie III. Le processus sec tend au contraire à se développer et connaît, comme nous le verrons, le plus grand potentiel d'innovation. Sa composition actuelle intègre cependant 4% à 15% de liants polymères impactant son énergie grise.

D'un point de vue de leur composition, la masse volumique des matériaux intègre entre 80% et 95% de bois résineux selon leur procédé de fabrication et leur densité. La masse des liants polymères utilisés étant inversement proportionnelle à celle des fibres. Ces liants et les autres additifs utilisés, majoritairement de nature synthétique, peuvent présenter un risque environnemental et sanitaire, même si certaines alternatives, comme les liants d'origine végétale, voient le jour. Concernant les LDB, la mise au point de mélanges avec d'autres matériaux isolants afin de coupler les qualités de chaque matériau peut également offrir des pistes d'innovation intéressantes.

Au niveau sanitaire, la fabrication, la mise en œuvre et la phase utile des F-LDB ne présentent aucun risque particulier, selon les fabricants, si les consignes minimums de protection sont respectées. L'influence sur la qualité de l'air intérieur indiquée sur la plupart des produits est parmi les meilleures : A ou A+. Certains additifs contenus dans le matériau présentent tout de même, ou sont susceptibles de présenter, un caractère nocif irritant ou même cancérigène. L'entretien réalisé H. PINCE révèle que les risques sanitaires, lors de la mise en œuvre, sont beaucoup moins importants qu'avec les laines minérales, à court et long terme.

1.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET TECHNIQUES DES L-FDB

1.2.1 TRANSFERT DE CHALEUR A L'INTERIEUR DES F-LDB

1.2.1.1 Définition :

La conductivité thermique λ exprimée en [W/m.K] d'un matériau est communément utilisée pour évaluer sa performance et correspond au flux de chaleur traversant les deux faces opposées d'un m³ de matière en une seconde pour une différence de 1 degré Kelvin. Cette valeur regroupe cependant trois types de transfert de chaleur différents propres aux matériaux solides : ²⁵

- La conduction, c'est à dire le transfert de chaleur par contact physique direct entre les molécules, exprimée par la conductivité thermique λ . Ce type de transfert est prépondérant dans un matériau solide.
- Le rayonnement, qui est l'énergie émise par un matériau dans toutes les directions et liée aux vibrations constantes des molécules situées en surface, elle se mesure par l'émissivité E
- La convection, qui est l'échange de chaleur entre un fluide comme l'air ou un liquide mobile et une surface.

Un isolant thermique possède une structure physique poreuse, fibreuse ou alvéolaire à l'intérieur de laquelle des cavités remplies d'air ou de gaz viennent minimiser les déperditions. L'air immobile ayant une faible conductivité thermique de $\lambda = 0,024$ W/m.K, celui contenu dans ces alvéoles doit donc tendre vers un compartimentage pour former des cavités les plus petites possibles limitant sa mise en mouvement. ²⁶

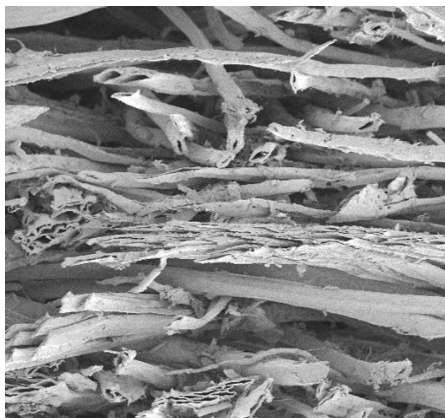


Illustration 5 : Vue macroscopique d'un isolant en fibre de bois

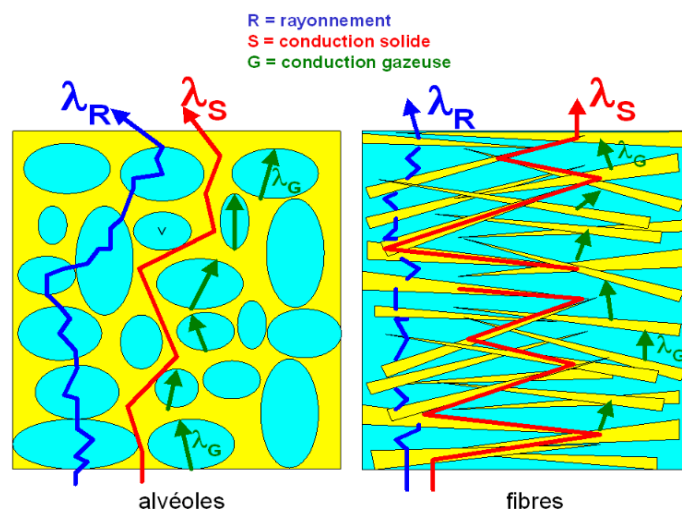


Illustration 6 : Caractéristiques physiques des transferts de chaleur à travers des matériaux alvéolaires (à gauche) et fibreux (à droite)

²⁵ H. MICHAUX, D. SCHMITZ – *Matériaux et chaleur* – Cours de BAC 1, Université de Liège, 2012 – p.13 à 22

²⁶ S. COURGEY, J-P. OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. – Terre vivante, Mens, 2010 – p.24 et 25

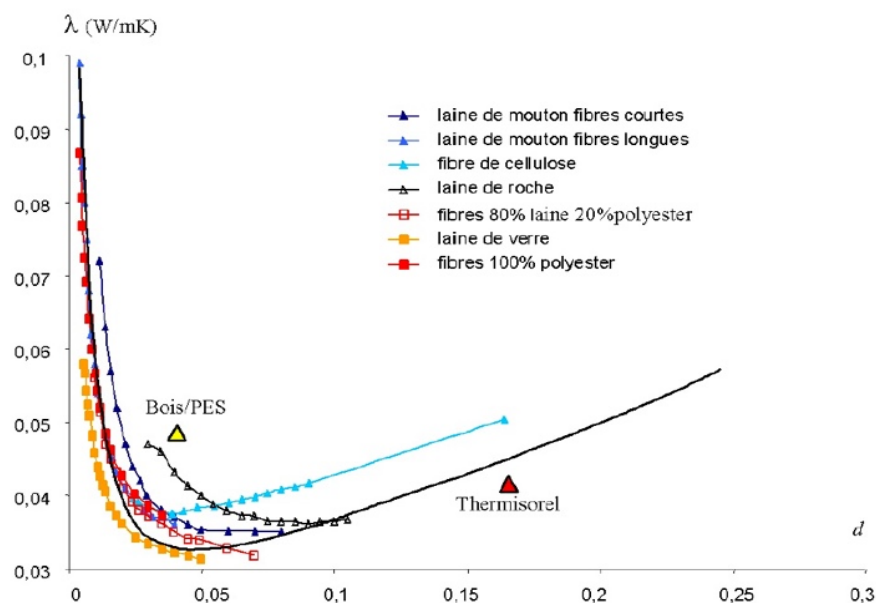
De plus, Les transferts par conduction étant les plus importants dans un solide, il est nécessaire que la structure physique des isolants entre ces cavités soit la plus fine possible. C'est donc la faible densité physique de cette structure et la multiplication des surfaces formées par l'interface structure/cavités qui limiteront les transferts par rayonnement et convection. Un matériau possédant une structure physique fine de faible densité avec un grand nombre de petites cavités aura donc une conductivité thermique réduite.²⁶

Dans un isolant fibreux, une faible conductivité thermique se traduit donc par une structure possédant les fibres les plus fines possibles et une densité faible. La conductivité thermique étant 33% plus importante dans le sens de l'axe de la fibre, il est impératif, lors du processus de fabrication, que celles-ci ne soient pas orientées dans le sens où le matériau subira des déperditions. Enfin, plus la tortuosité des fibres sera importante, plus les cavités formées seront petites et nombreuses.²⁷

1.2.1.2 Efficacité de la conductivité par rapport à la densité :

La porosité ouverte, des panneaux en fibre de bois varie approximativement de 70% d'air pour un panneau rigide de $\rho = 150 \text{ kg/m}^3$ à 90% d'air pour un panneau souple de $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$. Cette différence de densité explique les performances de résistance thermique plus élevées des LDB, par la réduction des pertes par conductivité, que celles des FDB.

Enfin, la colle blanche utilisée pour contre-coller les épaisseurs d'un panneau FDB dans le processus humide présentant une conductivité plus élevée atténue également son pouvoir isolant. Il existe néanmoins une valeur limite au-delà de laquelle la baisse de la densité du matériau affectera négativement ses performances thermiques en raison de la forte mobilité de l'air :²⁸



Graphique 1: Variation de la conductivité thermique selon la densité de divers isolants.

²⁷ A. KAEMMERLEN – *Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment* - Université Henri Poincaré, Nancy, 2009. – p 31

²⁸ J. LUX – *Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes : étude basée sur l'analyse d'images tridimensionnelles* – Université Sciences et Technologies, Bordeaux, 2005 – p 20

Il existe donc une valeur critique au-delà de laquelle les performances des isolants ne peuvent plus être améliorées. Pour les F-LDB représentées ici en noir, (dont l'un des repère proposé est la FDB Thermisorel) la masse volumique minimum souhaitable avoisine $\rho = 40 \text{ kg/m}^3$. On note aussi que la masse volumique n'est pas directement corrélée à la conductivité thermique d'un isolant, la configuration de la structure solide d'un matériau jouant un rôle important. Par exemple, la conductivité thermique d'une laine de bois de $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$ est comparable à celle d'un isolant en laine de mouton de $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$.

1.2.1.3 Considérations sur les performances :

Par la nature du procédé de défibrage, les LDB et FDB présentent l'inconvénient de posséder une structure fibreuse beaucoup plus épaisse que les laines minérales, augmentant l'importance du transfert par conduction, même si le matériau bois brut est plus isolant que le matériau brut minéral.

Les faisceaux de fibres ainsi que les variations entre les espèces, l'hygrométrie et la qualité du bois, rendent difficilement modélisable la nature des transferts à l'intérieur du matériau et engendrent des performances différentes pour des densités équivalentes. La compréhension et la visualisation de ces transferts sont cependant rendues possibles par les nouvelles technologies comme l'imagerie thermographique tridimensionnelle. Enfin, le bois ayant une nature physico-chimique particulièrement sensible aux variations de température et d'hygrométrie, ces deux paramètres ont une influence importante, surtout s'ils sont cumulés, pouvant affecter les performances de manière significative.²⁹

Avec une conductivité thermique moyenne de $\lambda = 0,038 \text{ W/m.K}$, les LDB possèdent une performance thermique moyenne, comparable à celles des autres isolants biosourcés végétaux comme la laine de lin ou la laine de mouton mais restant inférieure d'environ 10% à celles des isolants fibreux minéraux et de près de 40% à celle du polyuréthane.³⁰ Ces écarts sont respectivement de 15% et de 50% pour une FDB ayant une conductivité thermique moyenne de $\lambda = 0,044 \text{ W/m.K}$. Une amélioration du processus industriel au niveau du défibrage, un choix judicieux des essences permettant d'obtenir une structure des fibres plus fine minimisant leur regroupement par faisceaux ainsi qu'une teneur en eau la plus faible possible, semblent être les pistes d'amélioration privilégiées même si, en raison de la loi de la densité, les performances maximales du matériau semblent avoir été atteintes pour les LDB les moins denses.

Même si l'on manque de recul historique pour en vérifier la véracité, mises à part les LDB les moins denses pouvant connaître des effets de tassement, les F-LDB disposent, par ailleurs, d'une bonne préservation de leurs propriétés de conductivité thermique, et de leur résistance mécanique, tout au long de leur durée de mise en service.³⁰ Ainsi, une densité faible offrant de meilleurs performances semble incompatible avec la préservation de ces performances dans le temps.

²⁹ J. LUX – *Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes : étude basée sur l'analyse d'images tridimensionnelles* – Université Sciences et Technologies, Bordeaux, 2005 – p 10 et 11

³⁰ S. COURGEY, JP. OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. – Terre vivante, Mens, 2010 – p. 98 à 107

1.2.2 INERTIE THERMIQUE ET TEMPS DE DEPHASAGE

1.2.2.1 Définitions et principe de l'inertie thermique :

L'inertie thermique d'un matériau est encore une notion complexe à appréhender aussi bien à l'échelle du bâtiment, d'une paroi que d'un matériau. Elle peut être vue comme la capacité d'accumulation, de stockage et de restitution ultérieure de l'énergie qu'un matériau possède et peut jouer un rôle important dans la régulation thermique d'un bâtiment, que ce soit pour la restitution la nuit des calories accumulées pendant la journée en régime hiver ou pour l'atténuation de la température des pics de chaleurs estivaux dans le bâtiment en régime été. Elle ne joue donc pas directement un rôle sur la réduction des déperditions, mais offre un lissage des températures augmentant généralement le confort thermique du bâtiment surtout en période estivale.

Elle est liée à la capacité thermique massique c d'un matériau se définissant comme la quantité d'énergie nécessaire en Joules pour élever la température d'un mètre cube de matière après la variation d'un degré Kelvin, en Wh/kg.K. Dans un solide, elle dépend de la masse volumique « ρ », de la conductivité thermique « λ » et de la capacité thermique massique « c ». Elle peut être évaluée de manière simplifiée par la diffusivité et l'effusivité des matériaux :³⁰

La diffusivité thermique D (par transmission) :

Il s'agit de la durée du transfert de chaleur entre deux points du matériau : $D = \lambda / \rho \times c$ en $[m^2/s]$. Ainsi, plus la diffusivité thermique est élevée, plus un flux de chaleur traversera le matériau rapidement. Plus un matériau est lourd plus sa diffusivité est élevée. Elle est principalement caractérisée par le temps de déphasage et l'amortissement de la paroi.³¹

Diffusivité des matériaux de construction					
Rang	Matériau	Conductivité W/mK	Masse volumique kg/m³	Chaleur spécifique J/kgK	Diffusivité x 10⁸ m²/s
1	Fibre de bois SteicoTherm	0,04	160	2100	12
2	Laine de bois	0,1	400	1700	15
3	Panneau OSB	0,12	600	1150	17
4	Bois Sapin	0,15	500	1600	19
5	Bois Chêne	0,29	870	1600	21
6	Béton cellulaire	0,09	350	1000	26
7	Liège	0,05	120	1560	27
8	Plaque de plâtre	0,25	825	1000	30
9	Plâtre carreaux	0,25	820	1000	30
10	Brique pleine	0,74	1800	1000	41
11	Laine de roche	0,044	100	1030	43
12	Polyuréthane	0,03	34	1400	63
13	Béton plein	1,8	2300	1000	78
14	PSE extrudé	0,04	34	1450	81
15	Pierre	1,7	2000	1000	85
16	Laine de verre	0,04	25	1700	94
17	PSE expansé	0,04	26	1450	106
18	Acier	50	7800	450	1 425
19	Aluminium	230	2700	880	9 680
20	Cuivre	380	8900	380	11 236

Tableau 3 : Diffusivité thermique des matériaux de construction

³⁰ H. MICHAUX, D. SCHMITZ – *Matériaux et chaleur* – Cours de BAC 1, Université de Liège, 2012 – p. 34 à 38

³¹ S. COURGEY, J-P. OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. –Terre vivante, Mens, 2010 – p. 46 à 59

L'effusivité thermique E (par absorption) :

Il s'agit de la capacité du matériau à stocker et à échanger les calories avec son environnement, elle est donnée par : $E = \sqrt{\lambda \times \rho \times c}$ [J.K⁻¹.m⁻².s^{-1/2}]. Plus l'effusivité d'un matériau est faible, plus celui-ci sera sensible aux échanges calorifiques avec son environnement, par exemple, il s'échauffera rapidement s'il est soumis à un environnement chaud. L'effusivité joue donc un rôle dans l'interaction des premiers centimètres du matériau, côté intérieur de la paroi, avec l'air ambiant du local. Plus un matériau est lourd plus son effusivité est élevée ³¹

Effusivité des matériaux de construction					
Rang	Matériau	Conductivité W/mK	Masse volumique kg/m ³	Chaleur spécifique J/kgK	Effusivité J/m ² ·K·s ^{1/2}
1	Cuivre	380	8900	380	35 849
2	Aluminium	230	2700	880	23 377
3	Acier	50	7800	450	13 248
4	Béton plein	1,8	2300	1000	2 035
5	Pierre	1,7	2000	1000	1 844
6	Brique pleine	0,74	1800	1000	1 154
7	Bois Chêne	0,29	870	1600	635
8	Plaque de plâtre	0,25	825	1000	454
9	Plâtre carreaux	0,25	820	1000	453
10	Bois Sapin	0,15	500	1600	346
11	Panneau OSB	0,12	600	1150	288
12	Laine de bois	0,1	400	1700	261
13	Béton cellulaire	0,09	350	1000	177
14	Fibre de bois SteicoTherm	0,04	160	2100	116
15	Liège	0,05	120	1560	97
16	Laine de roche	0,044	100	1030	67
17	PSE extrudé	0,04	34	1450	44
18	Laine de verre	0,04	25	1700	41
19	PSE expansé	0,04	26	1450	39
20	Polyuréthane	0,03	34	1400	38

Tableau 4 : Effusivité thermique des matériaux de construction

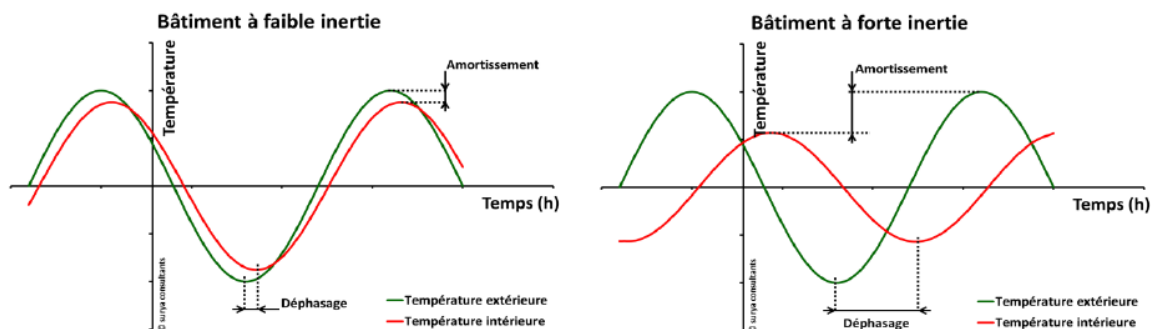
Donc, une paroi avec une forte effusivité et une faible diffusivité aura une inertie thermique plus élevée. Le tableau 3 montre que les LDB et surtout les FDB (Fibre de bois *SteicoTherm*) possèdent une diffusivité très faible, c'est à dire un temps de transfert de chaleur à l'intérieur du matériau lent. Le tableau 4 montre que les FDB et surtout les LDB possèdent l'effusivité la plus forte parmi les matériaux isolants classiques, et donc une capacité de stockage importante avec un échange de calories faible avec l'environnement extérieur. Les F-LDB, ont donc, au premier abord, d'excellentes caractéristiques d'un point de vue de l'inertie thermique.

1.2.2.2 Inertie thermique par transmission, temps de déphasage et amortissement :

La diffusivité thermique par transmission d'une couche de matériau ou d'une paroi peut être appréhendée en terme de temps de déphasage η et d'amortissement ϕ . Ces notions intègrent deux nouveaux paramètres : l'épaisseur e des couches de matériaux et un cycle de variation des températures, généralement de 24 heures. ³¹

Le temps de déphasage η :

C'est la différence de temps entre les pics de chaleur intérieure et extérieure du bâtiment rendue possible par l'inertie thermique des parois. Il n'atténue donc pas mais retarde la diffusion de chaleur. Un temps de déphasage élevé permet, en régime été, d'accumuler la chaleur aux heures les plus chaudes pour la restituer aux heures les plus froides, que ce soit par transmission à l'intérieur du bâtiment ou par réflexion vers l'air extérieur. Il se calcule en tenant compte de la diffusivité « D » et de l'épaisseur « e » en mètres habituellement sur une période de 24 heures.³¹



Graphique 2 : Déphasage et amortissement d'une paroi à faible et à forte inertie

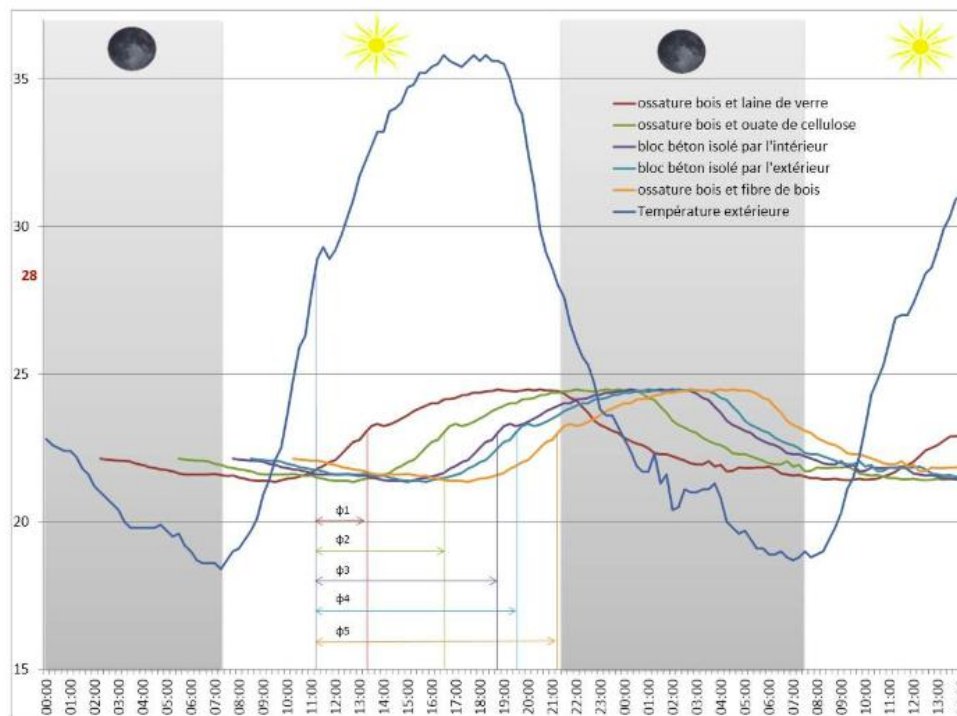
Dans la réalité, le temps de déphasage n'est pas strictement proportionnel à l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation.³¹ Cependant, un calcul simplifié reprenant les données du tableau mis à disposition par l'AREVE (Agence de Rénovation Énergétique de l'Est Var) peut nous aider à appréhender ces valeurs.³² En effet, une FDB d'une masse volumique de 120 kg/m^3 et d'une épaisseur de 20 cm aura un temps de déphasage très élevé, compris entre 12 à 14 heures. Vient ensuite la ouate de cellulose dont le temps de déphasage est limité à 10 heures pour 20 cm. Les panneaux souples comme les LDB, en revanche, ne disposent que d'un temps de déphasage réduit, compris entre 6 et 8 heures, toujours pour 20 cm d'isolation. Les laines minérales et les isolants synthétiques ont les performances les plus médiocres, avec un temps de déphasage relativement court, compris entre 4 et 7 heures pour une épaisseur équivalente. Ainsi, les FDB possèdent une amplitude de déphasage optimal, idéal en ITE, durant la période estivale.

Contrairement à un calcul d'indice d'affaiblissement acoustique ou de la résistance thermique, l'ordre de succession des couches est susceptible de jouer un rôle important dans l'efficacité de l'inertie thermique d'une paroi.³¹

³² Tableau comparatif global des isolants –AREVE– Disponible sur : https://areve83.fr/faq_materiaux.php

Temps de déphasage et système constructif :

Le système constructif utilisé est également prépondérant : les parois maçonnées lourdes disposent d'une meilleure inertie et donc d'un temps de déphasage plus élevé que les ossatures bois. Ces dernières étant pénalisées, les bonnes performances de diffusivité de l'isolation sont prépondérantes. Les LDB et FDB s'avèrent donc, là encore, très complémentaires à ce système constructif, comme le montre le graphique ci-dessous récapitulant le temps de déphasage moyen de parois types :



Graphique 3: Comparaison du temps de déphasage de diverses parois types

On peut en déduire 2 observations :

- Parmi les 5 solutions proposées, Une ossature bois isolée en laine de verre propose un temps de déphasage le plus médiocre, de 5 heures, alors que la même ossature avec une fibre de bois proposera un temps de déphasage plus performant. Le rôle de l'isolant reste prépondérant dans le temps de déphasage d'une paroi par rapport aux autres matériaux la constituant.
- L'ordre de la succession des couches n'a qu'un impact limité sur le temps de déphasage (seulement une demi heure de plus pour une paroi en béton en ITE par rapport à la même paroi en ITI). C'est donc la nature des matériaux constituant la paroi qui reste primordiale dans l'inertie par transmission.

Le facteur d'amortissement φ :

Il s'agit d'un coefficient en pourcentage qui exprime la différence de température entre le flux de chaleur entrant et le flux de chaleur sortant. Par exemple, une paroi ayant un flux entrant de 30 °C et un flux sortant de 20 °C aura un facteur d'amortissement de 33%. Là encore, les fibres de bois rigides se distinguent par une excellente performance : l'amortissement est de seulement 13,4% pour 30 cm à 120 kg/m³ quand il atteint 90% pour 30 cm d'isolation en laine minérale. Celui des laines de bois souples est plus limité : 53% pour 30 cm. Ce facteur d'amortissement élevé couplé au long temps de déphasage offrent aux FDB d'excellentes caractéristiques au niveau de l'inertie thermique extérieure.³¹

On notera cependant que l'inertie optimum d'un bâtiment dépend de son usage : un bâtiment utilisé de manière périodique avec une trop grande inertie sera plus long à chauffer et risque de restituer la chaleur ultérieurement à son usage, les cycles de déphasage pouvant s'accumuler pour avoir des répercussions sur plusieurs jours.

De plus, certaines fonctions nécessitent un temps de déphasage le plus faible possible en régime été afin de ne pas restituer la chaleur accumulée durant la journée pendant la nuit, comme par exemple un espace nuit dans une région méditerranéenne. Outre le système constructif, la classe climatique aura donc un impact significatif sur l'inertie par transmission d'un bâtiment. En outre, un climat méditerranéen, de par les pics de chaleur estivaux importants, devrait posséder un temps de déphasage plus élevé, idéalement supérieur à 12 heures dans les espaces de vie. Il est donc paradoxal de constater que les LDB ET FDB possédant parmi les meilleures caractéristiques au niveau de la diffusivité thermique, ne soient que minoritairement employées dans ces régions pour des espaces de vie.

1.2.2.3 L'inertie thermique « intérieure » par absorption :

L'inertie intérieure sera fortement conditionnée par la composition des premiers centimètres du parement interne de la paroi et jouera le rôle de régulateur thermique avec l'air ambiant du local. L'ordre des couches aura une importance majeure : en effet, une couche avec une forte effusivité, comme une maçonnerie ou un complexe en panneaux d'argile entre l'isolation et la finition intérieure, permettront de lisser les variations de températures entre l'air ambiant et les premiers centimètres de la paroi côté intérieur. Cette inertie présente deux intérêts : ³¹

- Réduire la réactivité nécessaire du système de chauffage en régime hiver tout en limitant la surchauffe en régime été. Ainsi, une solution d'ITE paraît avantageuse au niveau de l'inertie interne, par la stabilité des températures due à l'inertie d'une couche lourde en intérieur. Par opposition, un complexe de finition sur isolation légère n'aura qu'une très faible capacité de stockage et nécessitera un système de chauffage plus réactif.
- Améliorer le confort thermique de l'habitat en réduisant les différences de température entre l'air ambiant et la paroi par un lissage de leurs variations.

Les isolants légers ne sont donc pas les matériaux appropriés pour garantir une bonne inertie intérieure, leurs effusivités étant beaucoup plus faibles d'après le tableau 4 : $38 \text{ [J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}]$ pour le polyuréthane contre $2\,000 \text{ [J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}]$ pour le béton et la pierre. Cependant les LDB se retrouvent parmi les solutions isolantes les plus performantes avec $261 \text{ [J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}]$ quand celles des autres isolants oscillent entre 38 et $120 \text{ [J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}]$. On peut donc en conclure qu'une solution en LDB souples reste la moins pire des solutions dans le cadre d'un complexe « isolation/finition intérieure », même s'il reste préférable d'avoir un support lourd afin d'optimiser les propriétés de cette inertie intérieure.

Outre les bonnes caractéristiques des F-LDB au niveau de l'inertie, on observe que la faible diffusivité des FDB posées en ITE s'inscrit dans une complémentarité avec la grande effusivité des LDB, lorsque ces dernières sont posées en ITI. Ainsi, la complémentarité constructive des F-LDB rejoint celle de l'inertie thermique, surtout dans le cas d'une ossature bois.

³³ H. MICHAUX, D. SCHMITZ – *Matériaux, Air et Eau* – Cours de BAC 1, Université de Liège, 2012 – p. 17 à 23.

³⁴ S. COURGE, J-P. OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. – Terre vivante, Mens, 2010 – p. 66 à 73

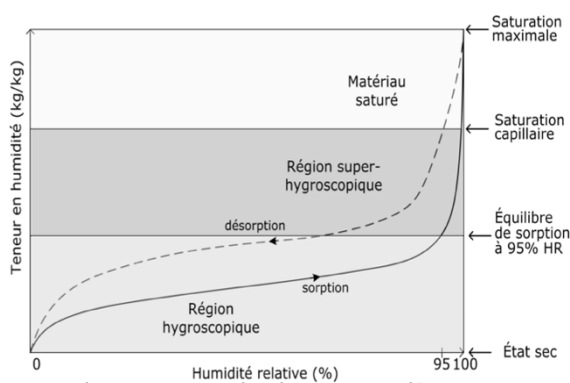
1.2.3 L-FDB ET HYGROMÉTRIE

Une grande majorité des isolants souples est sensible à l'humidité. Si les F-LDB présentent de bonnes caractéristiques lorsqu'elles sont en présence d'un air chargé de vapeur d'eau, une exposition à l'humidité prolongée sous forme liquide issue de la condensation de la vapeur d'eau une fois le point de rosée atteint, peut générer plusieurs pathologies affectant souvent de manière significative leurs caractéristiques mécaniques et leurs performances thermiques.

1.2.3.1 Comportement et perméabilité des F-LDB à la vapeur d'eau :

Deux paramètres liés à la vapeur d'eau rentrent en jeu lors de l'analyse hygrométrique d'une paroi ou d'un matériau. Le premier est son comportement face à des teneurs variables de vapeur d'eau dans l'air et le second sa perméabilité à la vapeur d'eau permettant le transfert de celle-ci ou non à travers une paroi. Ces deux paramètres font intervenir la notion d'humidité relative notée HR et exprimée en pourcentage de l'humidité absolue par rapport à l'humidité saturante pour une température donnée. Celle-ci peut donc augmenter jusqu'à atteindre le niveau de l'humidité saturante (HR = 100%) à partir duquel un point de rosée se forme et le surplus de vapeur d'eau se condense. L'apparition du point de rosée est donc liée à la température et à la concentration en vapeur d'eau présente dans un matériau.³³

Au niveau de leur comportement, Les F-LDB, possèdent une porosité ouverte démultipliant son coefficient d'absorption de l'eau. Le bois est par ailleurs composé de fibres fines, il possède une capillarité importante faisant des isolants des matériaux hydrophiles tendant à accumuler la vapeur d'eau. Ces deux caractéristiques font des L-FDB, à l'image des autres matériaux fibreux biosourcés, un matériau hygroscopique. C'est à dire qu'elles possèdent une capacité d'accumulation et de restitution d'une partie de la vapeur d'eau présente dans l'air pour une humidité relative donnée et donc, jouent le rôle de régulateur hygrométrique.³³ Cette caractéristique ne fait pas l'objet d'un consensus dans une méthode de mesure permettant d'en comparer les valeurs au sein des matériaux de construction. Le diagramme de sorption d'un matériau hygroscopique peut tout de même nous aider à illustrer ce phénomène :



Graphique 4 : Courbe de sorption-désorption d'un matériau hygroscopique.

Un matériau hygroscopique pourra accumuler une grande quantité d'humidité relative avant d'entrer dans une phase précipitée de saturation. Elle peut atteindre 95% d'humidité relative en phase montante (phase de sorption) et 70% en phase descendante (phase de désorption) Une fois cet équilibre dépassé, la teneur en humidité du matériau augmente fortement et atteint rapidement son point de saturation.

³³ H. MICHAUX, D. SCHMITZ – *Matériaux, Air et Eau* – Cours de BAC 1, Université de Liège, 2012 – p. 17 à 23.

³⁴ S. COURGE, J-P. OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. – Terre vivante, Mens, 2010 – p. 66 à 73

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau peut se mesurer avec la grandeur « μ », sans unité mais correspondant à la résistance à la diffusion offerte par une lame d'air d'1 mètre d'épaisseur, donc $\mu_{\text{air}} = 1$. Cette grandeur peut être ramenée à l'épaisseur connue d'un matériau donné par le coefficient Sd sous la forme : $Sd = \mu \times e$. Afin de préserver les couches internes des parois des dégâts liés à une condensation de la vapeur d'eau, une fois le point de rosée atteint, deux stratégies peuvent être utilisées :³⁴

- Une stratégie utilisée traditionnellement depuis les années 70 pour limiter les problèmes de condensation à l'intérieur des parois en faisant « barrage » via la pose en surface interne d'un pare-vapeur étanche à l'air et à la vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi accumulée dans le local doit alors être évacuée par un renouvellement de l'air important. Outre la forte ventilation nécessaire, ce procédé présente l'inconvénient suivant : la difficulté de réaliser une couche parfaitement étanche à la vapeur d'eau et à l'air, ce qui peut générer une accumulation d'humidité fortement localisée et destructrice à l'intérieur des parois.
- La stratégie d'une paroi perspirante, caractérisée par la perméabilité progressive (de l'intérieur vers l'extérieur) des couches d'une paroi à la vapeur d'eau permettant le stockage et la migration de cette dernière, vers l'intérieur ou l'extérieur du local. Cette migration peut être régulée par un frein vapeur de préférence hygro-variable, c'est à dire, fortement fermé à la vapeur d'eau en hiver pour ne pas générer de risques de condensation à l'intérieur des parois lorsque les températures extérieures sont plus froides et, ouvert en été, afin de permettre sa migration vers l'extérieur. Ce dispositif nécessite une bonne étanchéité à l'air, des matériaux fortement hygroscopiques pouvant supporter une teneur en vapeur d'eau variable, un parement intérieur devant être environ 5 fois plus perméable à la vapeur d'eau que le parement extérieur, avec un $Sd_{\text{min}} = 1$ côté intérieur. En effet l'accumulation de vapeur dans l'une des couches ou dans l'interface entre deux couches peut générer une condensation.³⁴

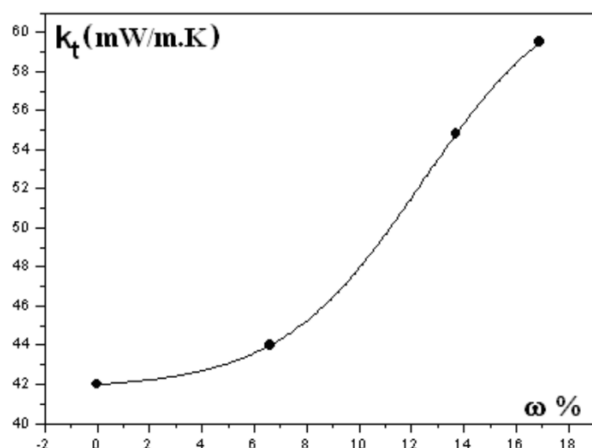
Dans le cas d'une paroi complètement étanche à la vapeur, les caractéristiques hygrométriques des couches internes, comme l'isolation, ne se posent pas. En revanche, l'ordre et le coefficient Sd des matériaux constituant la paroi auront une importance capitale, afin de permettre la migration de vapeur, dans le cas d'une paroi perspirante. Les LDB possèdent en plus de leur bon caractère hygroscopique, une résistance à la diffusion de vapeur $\mu = 1$ à 2 permettant donc une bonne migration de la vapeur à travers la paroi. Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau des FDB s'élève à : $\mu = 3$ à 5.³⁵

Cela signifie que, dans le cas d'une paroi perspirante, si l'on dispose une FDB en ITE et que l'on souhaite y associer une LDB en ITI, cette dernière doit avoir un coefficient Sd supérieur et donc une épaisseur 3 à 4 fois plus importante que la FDB au minimum, afin de ne pas avoir d'accumulations de vapeur dans l'interface entre ces deux couches. Ces paramètres peuvent être simulés grâce à la méthode de Glaser ou par le logiciel WUFI, ce qui permet de vérifier l'équilibre hygrométrique des parois.

³⁵ S. COURGEY, J-P. OLIVA— *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. — Terre vivante, Mens, 2010 — p. 106

1.2.3.2 Fibres et laines de bois et humidité persistante :

Malgré une bonne hygroscopicité, les F-LDB sont particulièrement sensibles à l'exposition prolongée d'eau sous forme liquide, comme les parois de certaines caves par exemple, même en la présence d'adjuvants de latex et de paraffine, l'humidité persistante affectant dans un premier temps significativement les propriétés mécaniques et la conductivité des F-LDB.



Graphique 5: variation de la conductivité thermique du Thermisorel selon sa teneur en eau en pourcentage de la masse totale d'après le CSTB.



Illustration 7 : Dégradation irréversible des propriétés physiques d'une LDB suite à l'exposition prolongée à l'humidité sur chantier.

En effet, L'exposition prolongée affecte leurs propriétés mécaniques de manière irréversible par la création de tassements et de rupture à l'intérieur du matériau. Les ponts thermiques dus à la lame d'air ainsi créée peuvent être importants dans le cas d'une application murale. Outre les caractéristiques physiques, le graphique 5 montre que la conductivité thermique du *Thermisorel* augmente de l'ordre de 20% si l'on passe d'une teneur en eau $\omega = 6\%$ de la masse, naturellement contenue dans le matériau, à une teneur en eau $\omega = 12\%$ de la masse. Les phases de chantier étant les cas où ces risques sont les plus grands, il est donc recommandé de bâcher les parois ou les échafaudages jusqu'à la fermeture de la paroi.

Cependant, lorsque la durée d'exposition n'est pas trop longue, les fibres de bois peuvent récupérer leurs performances initiales si le séchage est correctement effectué (cas d'un mauvais stockage temporaire par exemple). Les eaux de chantiers contenues dans une dalle et une chape peuvent poser le même problème. Une coupure de capillarité en pied de mur doit donc être réalisée à l'aide d'un matériau non hydrophobe et non capillaire. Même si la teneur en humidité prolongée reste faible et n'engendre pas de dégradation physique, elle peut rester à l'origine de la putréfaction des fibres ou occasionner l'apparition de mères (champignon).³⁶

Le liège étant le seul matériau biosourcé insensible à l'exposition prolongée à l'humidité, son emploi sera beaucoup plus pertinent dans des conditions d'humidité persistantes. Mises à part certaines FDB bituminées ayant une résistance temporaire à l'humidité persistante, tout contact prolongé des F-LDB avec l'humidité reste l'un des éléments pouvant affecter le plus significativement ses caractéristiques mécaniques et sa conductivité.

³⁶ V. GALMICHE – *Isolants biosourcés : points de vigilance* – AQC, Paris, 2016 – p. 33

1.2.4.1 La réaction au feu :

Le bois étant par nature un matériau fortement inflammable, la plupart des produits en fibre de bois sont classés M4 « *combustibles et facilement inflammables* » selon la classification française, ce qui correspond à une *Euroclasse E* « *contribution à l'embrasement généralisé très importante* » présente sur la plupart des FDES et DEP des fabricants, même si certains produits peuvent obtenir une classe plus avantageuse.

Cette mauvaise réaction exige la présence d'un parement coupe-feu comme le plâtre côté intérieur, le point de départ d'un incendie étant souvent lié à un accident depuis l'intérieur des locaux.³⁷ Leur *Euroclasse* proscrit cependant leur emploi dans les immeubles de grande hauteur : plus de 28 mètres de haut en non résidentiel et 50 m en résidentiel selon le code de la construction et de l'habitation français.

L'emploi des LDB et FDB est également inadéquat à proximité de sources intenses ou prolongées de chaleur comme un conduit de cheminée.² La laine de verre d'*Euroclasse A* étant beaucoup plus appropriée dans ces cas. Un autre problème en cas de combustion vient des gaz toxiques générés par les liants polymères ou les couches bituminées dans le cas des panneaux pare-pluie ainsi que la forte teneur en CO² propre à la combustion des éléments en bois et de leurs dérivés.

1.2.4.2 Le comportement au feu :

Les F-LDB s'avèrent être de grands propagateurs de flammes, une fois l'embrasement commencé, mais possèdent 3 qualités intéressantes en cas d'incendie. Premièrement, la toxicité des gaz émis, représentant 80% des décès lors d'un incendie, reste beaucoup moins importante dans les F-LDB que dans les solutions minérales ou synthétiques même si le dégagement en fumée est plus important. Deuxièmement, Les F-LDB présentent l'avantage de conserver plus longtemps leurs propriétés mécaniques en cas de sollicitation au feu, contrairement aux isolants synthétiques qui fondent plus rapidement. Mais surtout, elles possèdent des propriétés physiques, comme leur faible diffusivité, leur permettant de ralentir la propagation des températures élevées pouvant affecter le comportement de la structure du bâtiment.³⁸ Ce bon comportement en terme de temps nécessaire à la propagation du feu permet d'obtenir des valeurs REI 90 pour certaines parois, selon les tests réalisés en condition de laboratoire par le CSTB (Centre Scientifique et Technique de Bâtiment), si l'isolant est combiné à un parement adapté.³⁹

³⁷ S. COURGEY, J-P. OLIVA– *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. – Terre vivante, Mens, 2010 – p. 76 à 80

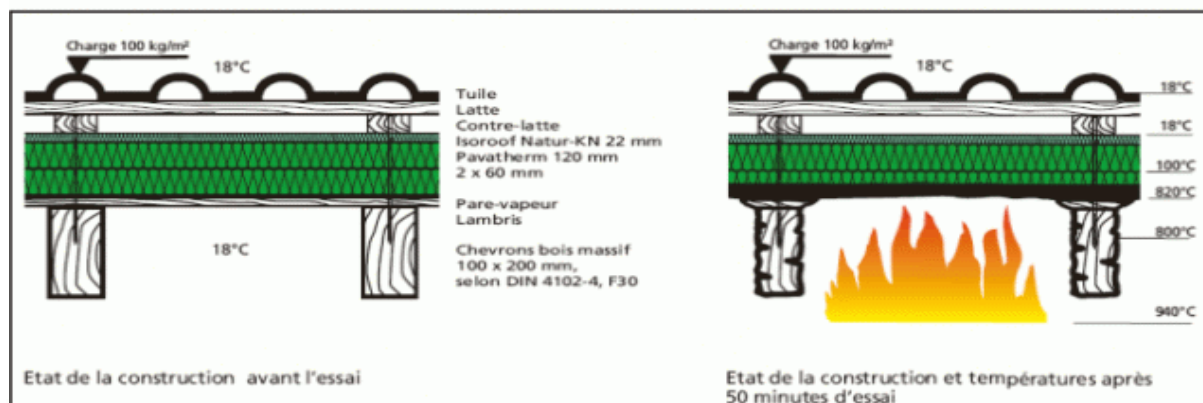
³⁸ *Mise en œuvre des produits Pavatex* – PAVATEX SA, Fribourg, 2014 – p. 70 à 72

³⁹ Site internet – *Protection au feu des isolants STEICO* – Disponible sur : <https://www.steico.com/fr/les-steico/protection-feu/>

Lorsque les F-LDB ne sont pas directement soumises aux flammes, cette caractéristique peut jouer un rôle crucial comme le démontre ce test de l'IBMB, équivalent allemand du CSTB : ³⁷

Comparatif d'essai au feu de toiture Sarking avec:

Pare-pluie: **Isoroof-Natur KN 22 mm**
Isolation: **Pavatherm 120 mm**



Pare-pluie: **Lé de recouvrement**
Isolation: **Laine minérale 140 mm**

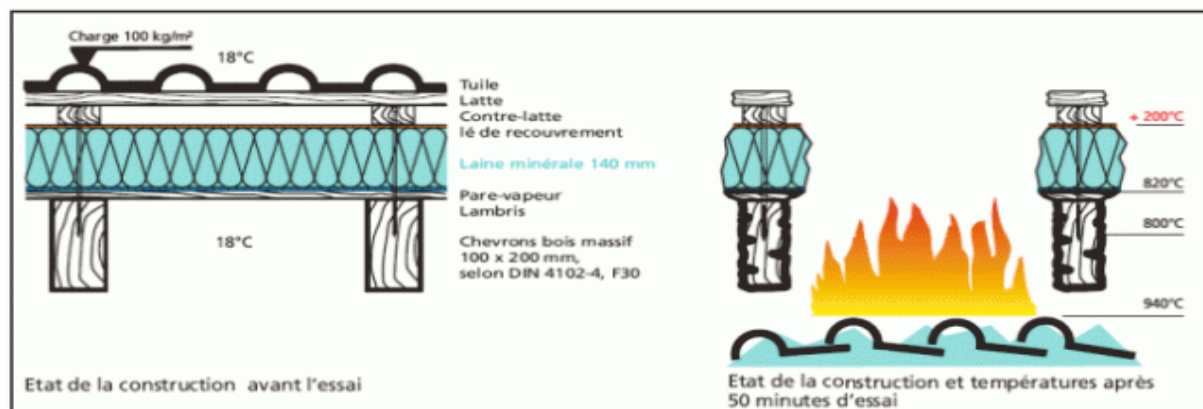


Illustration 8 : Test comparatif du comportement au feu de deux complexes de toiture selon L'IBNB.

Le test montre que le toit 2 en laine minérale ininflammable (*Euroclasse* A1) aura cédé en 50 minutes sous le poids des tuiles, contrairement au complexe en laine de bois dont seul le panneau inférieur sera carbonisé, la transmission de chaleur ayant fait perdre aux tasseaux leur résistance mécanique dans le toit 2. En effet, les températures atteintes au bout de 50 minutes sont très différentes : 200 degrés au niveau des tasseaux pour le toit 2 contre 100 degrés au milieu de la couche isolante pour le toit 1. Ainsi, même si les F-LDB possèdent une *Euroclasse* E, le rôle de bouclier thermique qu'elles peuvent offrir peut avoir des conséquences importantes sur la stabilité structurelle du bâtiment. Elles sont à ce titre plus performantes que des matériaux classés ininflammables. Les F-LDB conservent donc généralement une inflammabilité et participent grandement à la propagation de l'incendie, mais présentent globalement un bon comportement au feu, aussi bien dans le maintien de leurs propriétés mécaniques, dans la toxicité de leur fumée, que dans la transmission de la chaleur.

Les performances thermiques des L-FDB sont similaires à celles des autres matériaux biosourcés végétaux conditionnés sous forme de panneaux et occupant des postes similaires. Cette performance est d'abord liée à la densité du panneau mais également à la qualité des essences utilisées, la finesse et la tortuosité des fibres. Or, le seuil de densité optimum semble avoir été atteint pour les produits les plus souples, limitant l'amélioration des performances thermiques à venir.

L'un des points distinctifs des F-LDB est son excellente inertie thermique, aussi bien par le temps de déphasage et l'amortissement élevés des FDB jouant un rôle dans l'inertie par transmission des couches extérieures, que par le rôle de régulateur de la température interne, des LDB, même si un matériau lourd est préférable dans ce dernier cas. L'amélioration du confort thermique qu'elle génère par le lissage des températures ambiantes du local reste cependant difficilement mesurable, car il faut prendre en compte de nombreux paramètres comme la classe climatique, l'ordre et l'épaisseur des couches ou encore son caractère souhaitable ou non par rapport à une fonction donnée du bâtiment. Elle demeure ainsi souvent négligée dans les simulations thermiques orientant la prise de décision des maitres d'œuvres.

Au niveau hygrométrique, les F-LDB possèdent un caractère hygroscopique intéressant, leur permettant d'accumuler une quantité importante de vapeur d'eau et d'en réguler les échanges avec l'air intérieur. Cet aspect combiné à sa faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau en fait un matériau intéressant lorsqu'il est employé dans le cadre de parois perspirantes, ces qualités étant rendues caduques lorsque la paroi est complètement étanche à la vapeur. Le matériau reste néanmoins inapte à l'emploi dans le cadre de parois à l'humidité persistante, les dommages causés pouvant être lourds et irréversibles, avec d'importantes conséquences sur les caractéristiques mécaniques et la performance du produit.

L'un des aspects les plus défavorables caractérisant les matériaux reste leur réaction au feu. Même si les traitements ignifugés peuvent les rendre difficilement inflammables, ils conservent pratiquement tous une Euroclasse E. Leur comportement au feu, générant une fumée moins toxique, un bon maintien des caractéristiques mécaniques et un rôle de bouclier thermique dans la propagation de fortes chaleurs, restent néanmoins des atouts considérables. Un parement ignifugé comme le plâtre empêchant ou retardant la mise en contact des flammes avec le matériau est donc à prescrire, même si le matériau supporte convenablement les fortes chaleurs.

Dans les aspects abordés, il est récurrent de constater que les performances d'un isolant ne peuvent pas être caractérisées sans tenir compte du complexe de paroi auquel il est intégré et, plus généralement, des dispositions constructives, géographiques et formelles de chaque bâtiment. L'analyse de paramètres purement techniques connaît donc les limites liées au contexte dans lequel chaque matériau évolue.

PARTIE II

LA STRUCTURE DE LA FILIERE DES F-LDB

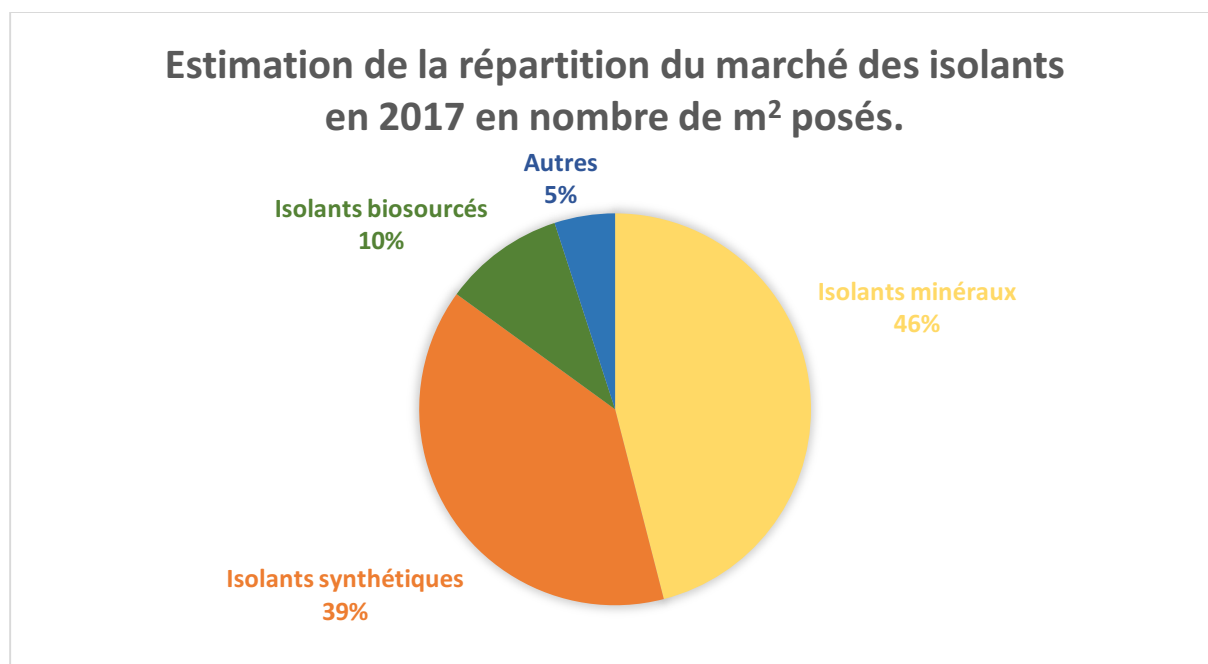
Cette partie a pour objectif d'examiner les aspects socioéconomiques et législatifs, ainsi que l'appréhension du matériau par les acteurs du monde de la construction afin d'en déduire quelles sont les forces et faiblesses du secteur et donc les possibilités d'évolution de la filière.

Dans un premier temps, nous essayerons de déterminer quelles sont les caractéristiques concernant l'appareil productif du matériau sur le territoire, en examinant successivement la place qu'occupe la filière des F-LDB dans l'ensemble des produits isolants, puis des produits isolants biosourcés. Un zoom sur la structure du secteur, sur les freins et opportunités liés à son mode de production ainsi que sur les pistes explorées par la Recherche et Développement sera ensuite effectué afin d'évaluer dans quelles mesures cette production est susceptible de se développer et s'inscrit dans une démarche durable.

Dans un second temps, nous nous intéresserons à l'impact que peuvent avoir les aspects politiques et législatifs vis à vis du développement de la filière mais surtout à la manière dont le matériau est appréhendé par les acteurs du bâtiment et de sa production, à travers une série d'entretiens individuels semi-directifs menés chez 2 architectes, 2 artisans poseurs et 2 représentants des fabricants principaux.

2.1.1.1 Les F-LDB dans le marché global de l'isolation :

Le marché global de l'isolation du bâtiment se relève lentement à la suite d'une stagnation ces dernières années affectant le monde du bâtiment suite à la crise de 2008. Le secteur se porte cependant mieux que celui de la construction neuve, ce dernier ayant subi une baisse d'activité significative suite à la crise économique, cependant, il repart à la hausse. L'indépendance du marché de l'isolation par rapport à celui de la construction neuve, s'explique en partie par l'augmentation des exigences réglementaires liées à la politique de transition énergétique ainsi qu'à la part importante de l'isolation allouée au champ de la rénovation. Le marché de l'isolation par produit est cependant très inégalement réparti, comme l'indique le rapport de TBC (2012) qui nous donne une estimation représentative des parts en termes du nombre de m² posés en 2017, reprise dans le graphique suivant : ¹



Graphique 6 : Estimation Répartition des parts de marché de l'isolation en France en 2017

Le marché de l'isolation français reste donc très largement dominé par les solutions synthétiques et minérales cumulant 85% de part du marché total. Néanmoins, la part des isolants biosourcés est très minoritaire mais a largement augmenté ces dernières années : de l'ordre de 40% entre 2012 et 2016 selon l'AICB (Association des Industriels de la Construction Biosourcée). ² L'Agence Alcimed estime que cette part pourrait passer à 13% d'ici 2030. ³ La conjoncture actuelle semble donc être favorable aux isolants biosourcés, même si leur part de marché reste minoritaire.

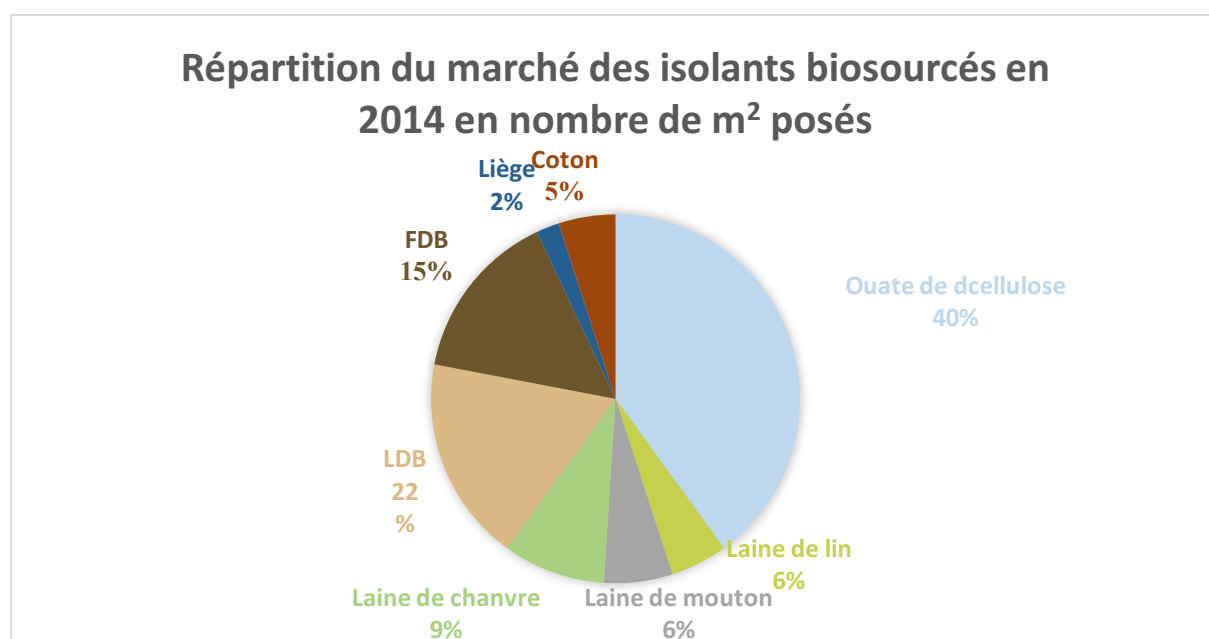
¹ Les isolants thermiques pour le bâtiment en 2017 en France – TBC (Extrait), Toulouse, 2017 – p. 5 – 8

² Site internet – ASIV – Disponibles sur : <https://www.aimcc.org/union/asiv-isolants-vegetaux/>

³ V. GALMICHE – Isolants biosourcés : points de vigilance – AQC, Paris, 2016 – p. 5

2.1.1.2 Les F-LDB dans le marché de l'isolation biosourcée :

La répartition interne du marché lié aux isolants biosourcés est également caractérisée par une forte disparité dans la répartition des parts de ces produits. Leur part exacte est actuellement difficile à déterminer étant donné les biais liés au défaut du recensement des structures de petite taille, les grandes variations liées au dynamisme et le secret industriel propre au secteur. Les données les plus récentes disponibles sont celles publiées dans le projet de recherche Terracrea (2014).⁴ Certains produits, dont le taux d'emploi est inférieur à 1%, comme la paille ou la chènevotte, ne sont pas comptabilisés dans le graphique.



Graphique 7 : Estimation de la répartition des parts de marché de l'isolation biosourcée en France en 2014

On constate que le cumul des LDB et FDB représente 1/3 du volume des produits, soit 3% du marché de l'isolation total. Les représentants des fabricants estiment quant à eux que la part des F-LDB serait proche de 50% des parts de marché des isolants biosourcés. Avec la ouate de cellulose, Les F-LDB dominent largement le marché et restent l'une des solutions les plus employées comme le confirment les entretiens. Les différences de parts entre les produits sont essentiellement liées à la structuration de leur appareil productif et à la disponibilité de leur ressource, principaux freins rencontrés par ces filières. Selon l'entretien réalisé avec F. JOSCHT « le secteur des F-LDB connaît une progression importante, de l'ordre de 15% par an depuis 5 ans ». ⁵ Néanmoins, dans les pays précurseurs quant à leur production, on constate une stabilisation de la part de marché aux alentours de 10% de tous les produits confondus, selon le rapport de la PIPAME (2012).⁶

⁴ P. BESSE, H. VALKHOFF, L. FLOISSAC – *Projet de recherche TERRACREA* – Laboratoire de recherche de l'ENSAT, Toulouse, 2014 – p. 74

⁵ Annexe 5 : Entretien réalisé avec le représentant commercial de STEICO SA – Franck JOSCHT

⁶ N. MERLE-LAMOOT, G. PANNETIER – *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolution à échéance 2020* – PIPAME, Paris, 2012 – p. 101

2.1.2.1 Les freins propres aux filières de matériaux biosourcés :

D'un point de vue du développement durable, les filières d'isolation biosourcée présentent certains avantages par rapport à leurs concurrents synthétiques et minéraux. A l'exception des panneaux FDB et liège, leur énergie grise est généralement plus faible et, par définition, leur matière première issue de biomasse animale ou végétale est renouvelable. Leur fabrication présente souvent un intérêt socioéconomique caractéristique : il s'agit la plupart du temps d'une ressource territorialisée sur l'ensemble de son processus de production. Certains de ces matériaux créent de ce fait une complémentarité importante avec les secteurs de l'agriculture ou de l'élevage dont ils recyclent ou réemploient les sous-produits, c'est le cas des isolants issus de biomasse animale, de la ouate ou encore de la paille.

Outre leur bilan environnemental valorisant, la palette très diversifiée des produits ainsi que les nombreux couplages de produits entre eux, par exemple la laine de chanvre avec la laine de coton, la laine de bois ou la laine de lin, offrent de larges domaines d'expérimentation. Ces matériaux sont également caractérisés par une grande diversité dans le statut et la taille des acteurs liés à leur production : associations, coopératives, PME impliquant davantage le citoyen en tant qu'acteur, mais valorisant surtout la ressource biomasse d'un territoire.⁷ Même si leur part augmente, les filières des isolants biosourcés sont encore soumises, dans des degrés variables, à plusieurs freins les cantonnant à une part de marché encore marginale. Cette partie tentera d'illustrer dans quelle mesure la filière des F-LDB est confrontée à chacun d'entre eux. Ces freins sont multiples et spécifiques à chaque matériau, les rapports émis par Nomadéis (2012) et l'association C&B (Construction & Biosourcerie)(2016) en distinguent cependant 6 prépondérants et communs à de nombreuses filières : ^{7et 8}

- Le prix encore compétitif des énergies fossiles.
- Le manque de structuration du secteur
- La disponibilité limitée ou la concurrence avec d'autres secteurs pour l'exploitation de la ressource
- L'obtention des certifications permettant leur mise sur le marché et la réglementation thermique.
- Le manque de visibilité ou de considération de la part des maîtres d'œuvre/d'ouvrage.
- La trop grande spécificité technique des produits.

On note que ces freins sont de nature différente, celui du prix encore compétitif des énergies fossiles est extérieur au secteur des F-LDB, ceux liés à la disponibilité de la ressource et à la spécificité technique des produits ne peuvent que difficilement être surmontables.

⁷ *Les filières de construction de matériaux biosourcés : plans d'actions, avancées et perspectives* – Collectif C&B, Maillot, 2016 – p. 3 à 7

⁸ J-M GROSSELIN (Dir.) – *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction* – Nomadéis, Paris, 2012 – p 6 à 15

Enfin, les freins liés à la structuration de la filière, sa visibilité et sa considération par les acteurs de la construction ainsi que le volet de la certification restent de nature conjoncturelle, c'est à dire qu'il est théoriquement possible d'y apporter des améliorations, qu'elles proviennent du secteur des F-LDB lui-même ou d'acteurs extérieurs. Le prix encore compétitif des énergies fossiles reste un paramètre dont l'analyse est relativement complexe à appréhender et concerne la plupart des acteurs de l'éco-construction, il ne sera donc pas abordé dans ce mémoire. Comme nous le verrons dans cette sous-partie, la nature de l'appareil productif des F-LDB lui permet de palier aux freins liés à sa production et donc à sa visibilité. Les freins liés à la considération des maîtres d'œuvre / d'ouvrage ainsi que le rôle des politiques publiques et la législation seront analysés dans les sous-parties 2.2 et 2.3. Le problème lié à la disponibilité ou à la concurrence concernant la ressource sera l'objet de la sous-partie 3.1. Il reste néanmoins nécessaire d'examiner succinctement l'impact de deux freins affectant la filière des F-LDB :

2.1.2.2 Le problème lié aux aspects de certification :

Plusieurs certifications, comme le marquage européen CE, ou les FDES lorsque le matériau concerné « *comporte des allégations à caractère environnemental ou utilisant les termes du développement durable ou ses synonymes* »⁹ reste obligatoire à la mise sur le marché des matériaux isolants. D'autres certifications comme celle de l'ACERMI (Association pour la CERTification des Matériaux Isolants) contrôlée par le CSTB⁹, bien qu'elles soient facultatives, restent des attestations de qualité largement utilisées et reconnues par les acteurs de la construction et comportent donc un certain caractère incontournable.

Les F-LDB sont issues d'un procédé industriel bien implanté leur permettant de bénéficier d'une standardisation importante. On pourrait donc penser que leur certification n'est qu'une formalité pour les industriels, contrairement à des secteurs de petite taille produisant des matériaux aux propriétés plus hétérogènes. L'entretien réalisé avec J. KENNELLY¹⁰ a révélé que « *la complexité technique, les délais importants pouvant s'étaler sur plusieurs années et les changements constants dans les critères de certification sont autant de difficultés ralentissant ou complexifiant les démarches.* »

2.1.2.3 Le problème lié à la trop grande spécificité technique des produits :

Certains produits peuvent requérir une mise en œuvre délicate nécessitant des savoirs faire spécialisés et peuvent donc être confrontés à une pénurie de main d'œuvre qualifiée. D'autres nécessitent des procédés de mise en œuvre impactant significativement le système constructif du bâtiment dans lequel ils s'inscrivent. L'exemple de la paille sous forme de bottes illustre bien cette double problématique : d'une part sa mise en œuvre requiert un haut degré de connaissance technique et la dimension standardisée des bottes implique une grande adaptabilité du système constructif dans lequel elles seront mises en place. La gamme des F-LDB étant relativement étendue, elle s'avère très adaptable dans un grand nombre de situations sans influencer significativement le dessin ou la mise en œuvre du procédé constructif.

⁹ Site internet – CSTB – Disponible sur : <http://evaluation.cstb.fr/fr/declarations-environnementales/>

¹⁰ Annexe 6 : Entretien réalisé avec le représentant commercial de ISONAT SA – Jérôme KENNELLY

2.1.3.1 Les acteurs produisant les F-LDB sur le territoire :

Même si l'on retrouve des emplois de L-FDB depuis le début du XX^{ème} siècle dans les pays scandinaves, leur commercialisation massive en France débute au cours des années 1980 et leur production sur le territoire depuis le début des années 2000.¹¹ Après une actualisation des données de l'étude de Nomadéis (2012), 5 acteurs fabriquent ce matériau sur le territoire : trois d'entre eux sont français : les entreprises FIBRANATUR, ISONAT, une filiale du groupe SAINT-GOBAIN et la coopérative EFFIREAL.^{12, 13 et 14} Le territoire comprend également deux sites de production originellement étrangers : l'Allemand STEICO ainsi que le Suisse PAVATEX racheté en 2016 par SOPREMA mais conservant son nom commercial.^{15 et 16} Le marché est majoritairement détenu par 3 entreprises d'envergure européenne et possédant une bonne maîtrise du secteur : STEICO, PAVATEX et ISONAT produisent une très grande partie des produits et peuvent mobiliser des ressources financières importantes. STEICO restant le seul acteur fortement spécialisé, PAVATEX et ISONAT n'étant que des filiales d'entreprises polyvalentes. FIBRANATUR et EFFIREAL génèrent un volume de production beaucoup plus restreint. La dernière est cependant le seul fabricant ayant un statut différent : il s'agit d'une SCOP, autrement dit une société commerciale où les salariés associés détiennent au moins 51% du capital de l'entreprise. Les décisions y sont prises collectivement, avec une pondération équivalente quelque soit le capital détenu par chaque associé.¹⁷



Illustration 9 : Répartition de la production des F-LDB à l'échelle nationale.

¹¹ J-M GROSSELIN (Dir.) - *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction* – Nomadéis, Paris, 2012 – p. 23 à 26

¹² Site internet – FIBRANATUR – Disponible sur : <http://www.fibranatur.com/mentions-legales.php>

¹³ Site internet – ISONAT – Disponible sur : <https://www.isonat.com/nouvelle-usine-100-fibres-de-bois-roanne>

¹⁴ Site internet – EFFIREAL – Disponible sur : <http://www.effireal.com/la-scop-effireal/>

¹⁵ Site internet – STEICO – Disponible sur : <https://www.steico.com/fr/le-groupe-steico/production/>

¹⁶ Site internet – PAVATEX – Disponible sur : <https://www.pavatex.ch/fr/contact/>

¹⁷ Site internet – Portail du Ministère de l'Economie – Disponible sur : www.economie.gouv.fr/entreprises/definition

Comme le montre la carte précédente, la production est répartie de manière homogène sur le territoire, ce qui limite la concurrence de l'accès à la ressource mais ne signifie en rien que la distribution des produits soit répartie de manière localisée.

A l'image des autres secteurs industriels du bâtiment, la filière est régie par une concurrence importante et connaît une grande instabilité : Le nombre important de rachats successifs ainsi que la fermeture de deux fabricants, ACTIS en 2013 et HOMATHERM en 2016 après une présence inférieure à 5 ans sur le territoire, sont symptomatiques des difficultés rencontrées par le secteur.¹⁸

Selon le rapport de Nomadéis (2012), on peut également observer une grande disparité dans la structuration des scieries pouvant être partenaires en fournissant les PCS nécessaires à la fabrication des panneaux. A l'échelle nationale, les 2/3 du volume de bois sont traités par 1/5 des scieries. Le parc restant est très atomisé : 50 % de ces dernières ne produisent que 4% du volume total de bois. En outre, le rapport de l'ADEME de 2013 confirme l'accélération de cette tendance, les plus petites entités ayant tendance à disparaître.

Au niveau de l'appareil productif, les coûts de production se répartissent dans des proportions égales entre les achats en matières premières, la main d'œuvre et les consommations énergétiques. Cette filière génère en 2012 un chiffre d'affaires de 100 millions d'euros et emploie près de 1000 personnes, soit plus de 10 fois le nombre de postes liés au secteur de la ouate de cellulose la même année.¹⁹

En 2012, la production annuelle de panneaux rigides s'élève à 100 000 m³, dont 80% de panneaux LDB pour 20% de panneaux FDB.¹⁹ Cet écart peut s'expliquer d'abord par la faible prédominance de l'isolation par l'extérieur en France mais surtout par le caractère 4 à 5 fois plus énergivore de la production de panneaux rigides générant des répercussions sur leur coût final et donc sur leur attractivité. Une autre raison est l'importation massive des F-LDB depuis l'étranger, principalement la Pologne et l'Allemagne où les coûts de production sont plus faibles. La France est donc devenue quasiment autosuffisante dans la production de LDB mais importe entre 70% à 80% des FDB en 2012.¹⁹ Ce ratio important d'importation explique les différences observées entre les parts de m² posés proposées dans le rapport Terracrea et les parts de production sur le territoire du rapport de Nomadéis (2012).

La filière présente donc la caractéristique d'être bien implantée sur le territoire, même si une importation importante des FDB, difficile à estimer avec des données actualisées, persiste. Le volume vendu ainsi que les parts de marché des F-LDB sont en forte augmentation et la filière reste l'une des plus développées parmi les biosourcés.

¹⁸ Site internet – *Traces écrites* – Disponible sur : <https://www.tracesecritesnews.fr/actualite/l-essentiel-de-l-actualite-economique-de-l-est-vu-par-traces-ecrites-news-87749>

¹⁹ J-M. GROSSELIN (Dir.) - *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction* – Nomadéis, Paris, 2012 – p. 22 à 32

2.1.3.2 Les avantages liés à la structuration de la filière :

Ce modèle industriel est d'abord caractérisé par un volume de production conséquent lui permettant de palier à des freins comme le manque d'économie d'échelle ou de visibilité éprouvés par de nombreux secteurs produisant des éco-matériaux. Ces deux aspects sont pourtant des éléments fondamentaux pour que le secteur de l'isolation biosourcée ait un poids dans la transition écologique à l'échelle nationale. Un tel modèle permet également de mobiliser d'importants moyens dans le domaine de la R&D, contrairement aux capacités d'investissements de structures plus modestes, ce qui confère à la filière un potentiel d'innovation technique important.

A l'image de nombreux secteurs biosourcés, La filière des F-LDB concentre sa production par rapport à une ressource relativement territorialisée, la matière première issue d'une ressource forestière ou de PCS (Produits Connexes de Scierie) se situant dans un rayon inférieur à 160 km pour chaque fabricant, d'après les FDES et DEP jointes en annexes 7 à 11. L'acquisition, auprès des scieries, de PCS par les acteurs de seconde transformation du bois, présente l'avantage de stimuler un secteur connexe traversant une crise durable en lui conférant de nouvelles sources de revenus. Cette relation instaure donc un partenariat durable et territorialisé, profitable aux deux parties, et ayant pour objet la revalorisation d'une ressource secondaire.

2.1.3.3 Les limites liées à la structuration de la filière :

Bien que la filière ne soit pas concernée par un grand nombre de freins propres aux autres filières biosourcées, un tel modèle industriel présente néanmoins un certain nombre de problématiques préjudiciables à sa durabilité environnementale et économique.

Premièrement, même si la ressource naturelle est disponible et prélevée à proximité par chaque acteur, ce caractère territorialisé s'arrête à la production. En effet, les matériaux peuvent ensuite parcourir des distances importantes avant d'être posés sur chantier. Steico n'hésite pas, par exemple, à communiquer sa volonté de conquête des marchés espagnols et portugais grâce à la production de son usine en région Bordelaise.¹

Ensuite, cet aspect oligopolistique de la filière engendre un certain nombre de biais, propres à ce type de marché. Le plus significatif est l'aspect fortement concurrentiel et la nature de la production caractérisée par un appareil productif lourd et onéreux qui ne laissent que peu de place à l'entrée sur le marché de nouveaux acteurs ayant des capacités d'investissements plus modestes. Les cas d'ACTIS et HOMATHERM, deux industriels ayant fermé leur site de production de F-LDB après une présence ne dépassant pas 5 ans sur le territoire, démontrent que l'investissement dans une chaîne de production seul n'est pas un gage de réussite. Un savoir faire historique permettant de produire les panneaux isolants à un prix abordable est aussi prépondérant pour pérenniser l'activité.

²⁰ Site internet – *Section Actualité de Steico France* – Disponible sur : <https://www.steico.com/fr/actu/actualites/>

Un entretien téléphonique avec la directrice de communication d'ACTIS (non répertorié en annexe car peu approfondi) a confirmé l'importance de ce paramètre : « *nous avons arrêté la production des panneaux en fibre de bois suite à l'implantation de groupes étrangers sur le territoire car nos coûts de production équivalaient à leur prix de vente, rendant impossible notre survie sur ce marché* ».

Ensuite, même s'il existe des possibilités de mélange des F-LDB avec d'autres produits minéraux ou synthétiques, SOPREMA et SAINT-GOBAIN produisent majoritairement des matériaux synthétiques et minéraux concurrents, dont l'empreinte environnementale élevée ne s'inscrit pas dans une démarche écoresponsable et dont la promotion peut générer un conflit d'intérêt avec celle des F-LDB.

Enfin, d'un point de vue du développement territorial, de nombreux élus régionaux cherchent à stimuler l'activité de leur territoire par des investissements ayant des retombées locales. Par exemple, la rédaction d'un cahier des charges incorporant une teneur minimum en produits biosourcés locaux pour une maîtrise d'ouvrage publique permet de stimuler une filière locale tout en promouvant le comportement écoresponsable des élus. Or, les retombées économiques au niveau régional sont moins évidentes lorsque ce marché est confié à des filiales dont les sociétés mères développent un grand nombre d'activités à l'échelle européenne.

La situation de la filière présente donc un caractère paradoxal avec des aspects difficilement conciliables. D'un côté, celui de la nécessité d'une production massive d'éco-isolants permettant une transition écologique du bâtiment efficiente et rapide à l'échelle nationale, mais ne paraissant envisageable que lorsqu'elle est portée par un appareil industriel important. De l'autre, la nécessité d'une production durable et décentralisées, impliquant davantage le territoire et les acteurs qui y sont liés. Ce modèle de production semble donc être favorable au développement de la filière des F-LDB mais connaît certaines limites au niveau de sa durabilité socio-économique.

2.1.4.1 Structure des axes de la R&D :

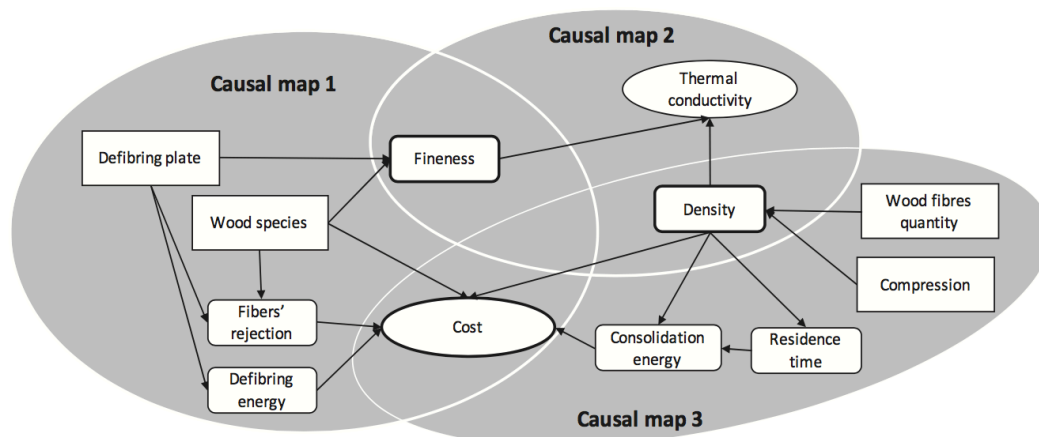
Les F-LDB font l'objet d'une innovation perpétuelle stimulée par le milieu industriel, caractérisant sa production. Les différents domaines liés à l'optimisation des performances des produits font appel à des domaines variés et fortement spécialisés.

Au niveau de la fabrication, on peut considérer trois champs d'expertises et de recherches principaux :²¹

- L'optimisation des produits.
- L'optimisation du processus de production.
- L'optimisation des variables intermédiaires, c'est à dire la réduction des différences causées par les variations de la qualité et du type de ressource utilisé.

Chacun de ces domaines d'expertise peut être décomposé en plusieurs sous-domaines. Cette spécialisation pose la problématique des répercussions de l'amélioration d'un des domaines sur les disciplines connexes. Par exemple, l'utilisation d'une fibre plus fine et tortueuse diminue la conductivité thermique du matériau mais affecte sa résistance mécanique, le matériau ayant plus de problème à reprendre sa forme initiale après compression.²¹ Ainsi, les objectifs de la R&D cherchent davantage à trouver l'équilibre optimum entre ces différents champs d'expertise plutôt que l'optimisation unilatérale d'un paramètre. L'organigramme ci-dessous récapitule ces domaines et sous domaines ainsi que leurs interactions :

M.H. Hobballah et al. / Expert Systems With Applications 92 (2018) 95–105



Graphique 8 : Relations entre domaines et sous-domaines de recherche

²¹ M-H HOBALLAH, A. NDIAYE, F. MICHAUD, M. IRLE – *Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge: Application to wood-based insulating materials* – Elsevier, Nantes – Elsevier - p. 99 à 102

Chacun de ces sous-domaines présente également deux autres caractéristiques : le degré de difficulté pour y apporter une amélioration et le caractère prioritaire du domaine de recherche selon les industriels interrogés dans le cadre de la Thèse de HOBALLAH *et al* (2017).²¹ Les domaines de recherche par rapport à ces deux paramètres peuvent être récapitulés en fonction du nombre d'experts mobilisés et du potentiel d'innovation réalisable sous la forme du tableau:

	Innovation facilement abordable	Innovation moyennement abordable	Innovation difficilement abordable
Priorité importante	Performance thermique	-Matière première des liants -Prix des matériaux	Maitrises des Variables de production
Priorité modérée	-Processus de défibrage -Propriétés mécaniques	-	Impact environnemental
Priorité faible	-	-Hygroscopicité du bois	-Efficacité du liant -Efficacité du processus de production

Tableau 5 : Axe de priorité et difficulté d'appréhension des domaines de recherche.

2.1.4.2 L'optimisation des produits :

D'une manière générale, ce sont les performances liées aux caractéristiques du produit qui constituent les axes de recherche prioritaires où le potentiel d'innovation reste facilement ou moyennement abordable. On observe que la finesse des fibres, la densité des panneaux et leur prix sont les trois éléments clé de l'optimisation du produit, le premier paramètre étant directement lié au choix des essences : un bois ayant des fibres naturellement minces réduira la quantité d'énergie nécessaire au défibrage et améliorera les performances d'isolation du produit.

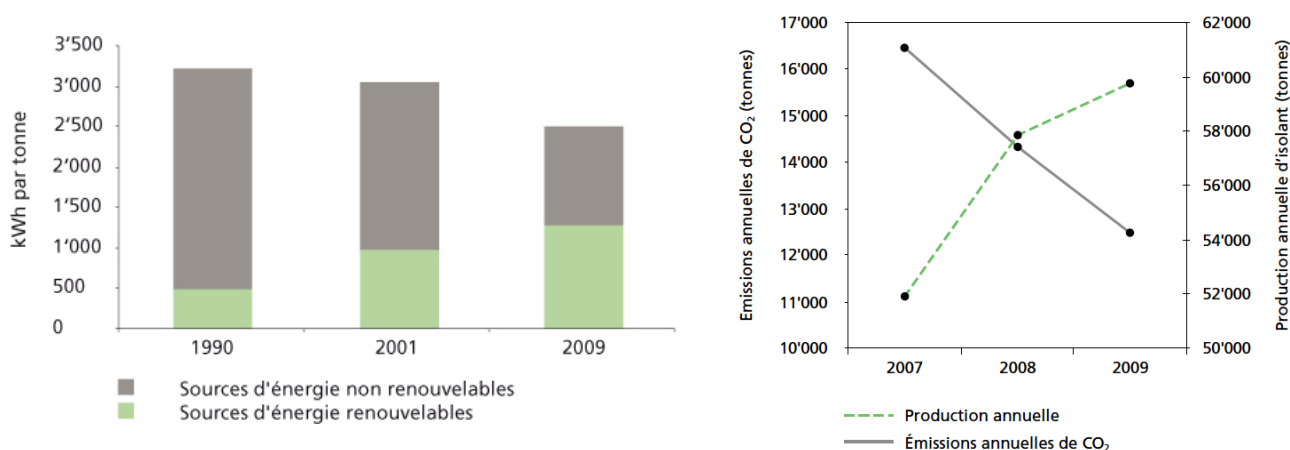
En effet, dans le processus humide, plus les fibres sont fines plus il y a libération de lignine et donc une surface de contact importante, ainsi, les performances mécaniques et de conductivité se rejoignent. Cependant, dans le processus sec, plus les fibres sont fines, plus le processus de polymérisation nécessitera une énergie de chauffage et une quantité de liant polymère importantes. Ce champ d'expertise est non négligeable, les liants polymères ne constituent certes que 4% à 15% de la masse du panneau mais près de 50% du coût en matière première.²¹

Une autre piste importante pour les fabricants, dans l'amélioration des LDB, est la quantité et la nature des liants utilisés. La quantité est, comme le démontre le tableau précédent, difficilement améliorable sans nuire aux caractéristiques mécaniques du produit. Cependant, la composition du liant reste un paramètre plus facilement modifiable : des liants d'origine végétal, comme l'amidon de maïs, ayant déjà été expérimenté, chez HOMATHERM. Or, ces liants étant plus onéreux, et la baisse du prix des F-LDB, une grande priorité pour les industriels, comme le confirme l'entretien réalisé avec F. JOSHT, il reste encore difficile d'envisager un recours prochain plus massif aux liants naturels.²²

²² Annexe 5 : Entretien réalisé avec le représentant commercial de STEICO SA – Franck JOSCHT

2.1.4.3 L'optimisation du processus de production :

La consommation énergétique liée au processus de production reste un point sensible du matériau, surtout dans le processus humide. Bien que les chiffres suivants illustrent les efforts de PAVATEX, ils émanent directement du fabricant sans faire l'objet d'une vérification indépendante certifiée, et doivent donc être interprétés avec prudence.



Graphique 9 : Quantités et proportions du type d'énergie nécessaire à la production des panneaux PAVATEX (à gauche) et évolution des émissions de CO₂ par rapport au volume de production (à droite)

Le rapport, dont les graphiques précédents sont issus, fait état d'une baisse de la consommation électrique de 22% et d'une augmentation des énergies renouvelables de près de 300% entre 1990 et 2009, notamment grâce à la part plus importante du combustible bois pour l'énergie de processus.²³ Cependant, il apparaît difficile pour les produits issus du procédé humide de diminuer davantage la part des énergies nécessaires : « les températures de chauffage importantes ne pouvant être diminuées en raison de la nature du processus » selon F. JOSHT.²² Ainsi, l'un des seuls leviers dont disposeront les FDB pour l'amélioration de leur procédé de fabrication sera la part des énergies renouvelables à intégrer au processus.

L'étape de défibrage, en revanche est l'un des postes les plus énergivores, avec 30% des consommations énergétiques mais également l'un des plus déterminants dans la qualité des futurs panneaux.²⁴ Son amélioration pour obtenir des fibres plus fines pourrait contribuer significativement à l'amélioration des F-LDB, à l'optimisation énergétique du procédé de production et à limiter les variables de production. Le tableau 5 démontre cependant que les caractéristiques environnementales et l'amélioration du processus de production ne constituent pas un axe de recherche prioritaire pour les entreprises interrogées dans cette enquête.

²³ E. BASLER, F. WERNER – *Construire et habiter avec la nature* – PAVATEX SA, Zurich - p. 11 à 13

²⁴ Annexe 11 : *DEP Isolants en fibres de bois* – STEICO SA, Institut Bauen und Umwelt, Berlin 2016 – p. 8

2.1.4.4 L'optimisation des variables de production :

On constate que selon le tableau 5, le domaine d'innovation le plus délicat mais aussi l'un des plus importants pour les industriels, est la maîtrise des variables liées à la matière première. En effet, un processus industriel se doit de proposer un matériau homogène. Le bois étant un matériau naturel, la matière première aura de nombreuses variables (essences, hygrométrie, qualité et taille des chutes). Ces variables sont d'autant plus présentes dans un processus de fabrication employant des chutes de scierie, leur origine étant souvent diversifiée. Là encore un aspect contradictoire apparaît : une sélection des meilleures fibres afin d'optimiser la conductivité impliquerait la perte de près de 40% du volume de fibres initial, ce qui invaliderait le processus industriel.²¹

2.1.4.5 Mise en relation avec les entretiens :

Les FDB et LDB présentent donc un certain nombre d'axes de recherche communs. Cependant, les paramètres d'optimisation de l'énergie de processus pour les premières et de la nature des liants pour les secondes diffèrent tant en possibilités d'amélioration qu'en intérêts industriels.

Les LDB connaissent un potentiel de développement intéressant de ce point de vue, tant par l'intérêt porté par les fabricants pour ce domaine, que par les expériences déjà menées chez HOMATHERM. Cependant, l'entretien réalisé avec F. JOSHT a confirmé, qu'il était peu envisageable d'apporter des améliorations aux produits si cela induit une augmentation de leur prix de vente, il paraît donc actuellement peu envisageable que les industriels s'engagent prochainement dans cette voie, même si elle offre un potentiel prometteur.²²

Les FDB, en revanche, semblent connaître une impasse liée à leur procédé industriel énergivore, affectant leur prix et donc leur potentiel à venir comme l'atteste « *la part de plus en plus prépondérante des LDB sur le marché* » selon F. JOSCHT²². Dans tous les cas, pour les représentants des fabricants, la baisse du prix des F-LDB afin d'accroître leur attractivité reste l'objectif prioritaire, les innovations apportées ne pourront donc se soustraire à ce paramètre.

²¹ M-H HOBALLAH, A. NDIAYE, F. MICHAUD, M. IRLE – *Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge: Application to wood-based insulating materials* – Elsevier, Nantes – Elsevier - p. 99

Les F-LDB ne représentent que 3% du marché de l'isolation mais restent une solution prépondérante dans la filière des isolants biosourcés et le secteur connaît une croissance régulière depuis 5 ans. Celle-ci semble liée à la production industrielle, ayant permis de diminuer de moitié le prix des matériaux depuis le début de la production sur le territoire, d'augmenter sa visibilité et de stimuler la R&D. Ce modèle industriel permet, en outre, de palier à un certain nombre de freins connus par d'autres filières d'éco-matériaux et donc de jouer un rôle plus important dans la transition écologique du pays.

La production se répartit sur le territoire entre 5 acteurs dont 3 sont largement majoritaires sur le marché et d'envergure européenne. Même s'ils sont bien répartis sur le territoire, ce petit nombre d'acteurs et leur importance posent néanmoins certaines limites. D'abord, le secteur est caractérisé par une grande instabilité économique caractérisée par un nombre de rachats successifs et la fermeture de deux sites de production. D'autres limites, comme la distribution sur de longues distances des produits et donc le caractère déterritorialisé de la filière, l'effet de collusion créé par le faible nombre d'acteurs ainsi que la difficulté, pour de nouveaux acteurs, d'entrer sur le marché en raison de l'investissement de départ important et de la bonne maîtrise du processus industriel nécessaire, sont autant d'aspects pouvant affecter sa durabilité économique.

Ainsi, la filière ne semble pas connaître de problèmes structurels empêchant son développement, d'un point de vue économique, mais ce système connaît certaines limites à la durabilité de son modèle qu'il semble pour l'heure difficile d'améliorer.

Concernant la R&D, les différents paramètres à prendre en compte rentrent souvent en contradiction dans l'amélioration des produits, du processus de production ou de qualité de la ressource utilisée. Il apparaît difficile d'améliorer les performances du produit, la recherche s'orientant davantage sur la diminution de son prix de production ou sur la qualité des composants qui y sont intégrés. Au niveau de la production, cela se traduit par la baisse de la consommation énergétique ou par le recours à une part plus significative des énergies renouvelables. A ce titre, les LDB font l'objet d'un potentiel d'amélioration intéressant pour les industriels au niveau de la nature des liants qu'elles intègrent, étant donné leur quantité importante, le prix élevé et la toxicité de leur composition. Les FDB ne possèdent que peu d'additifs et restent confrontées au problème de l'énergie importante nécessaire à leur production.

Les entretiens ont révélé unanimement un intérêt grandissant pour les solutions d'isolation biosourcées et particulièrement pour les F-LDB, qu'il s'agisse aussi bien des maitres d'ouvrage que des acteurs interrogés : maitres d'œuvres, poseurs et représentants des fabricants. Chacun des participants a travaillé à plusieurs reprises sur des projets intégrant ce matériau. Leurs opinions vis à vis des F-LDB s'avéraient souvent être orientés en la faveur de la promotion ou même de la nécessité de l'utilisation d'éco-matériaux dans le bâtiment. Cependant, tous ont souligné que certains de leurs confrères restent encore réfractaires à leur usage ou n'ont même jamais utilisé le matériau. Les entretiens ont tous révélé le rôle clé de la prise de position du maitre d'ouvrage par rapport au choix du procédé d'isolation mais aussi celui de conseil et d'aide à la prise de décision du maitre d'œuvre. En effet, un travail d'explication exposant les qualités des éco-matériaux souvent perçus comme trop onéreux reste la plupart du temps nécessaire. Les entretiens ayant été réalisés avec des architectes et poseurs ayant la réputation d'être engagés dans ce processus, ce travail d'explication pouvait s'avérer, pour eux, moins présent. Un grand nombre de maitres d'ouvrage les choisissant précisément en raison de cette orientation affichée.

L'appréhension du matériau par les acteurs interrogés peut se résumer par leurs réponses aux 4 questions types :

- *Avez-vous l'habitude de travailler avec ce matériau ?*
- *Quels sont, selon vous, les qualités et les défauts des F-LDB par rapport aux autres solutions d'isolation dans votre domaine de compétences ?*
- *Selon vous, quels sont les rôles de chacun dans la prise de décision conduisant à ce choix de solution isolante ?*
- *Quelles sont, selon vous, les raisons empêchant un recours plus massif au choix des F-LDB ou de toute autre isolation biosourcée ? Pensez-vous que cette solution sera amenée à se développer dans les années à venir ?*

2.2.1.1 Le point de vue des architectes :

Les bonnes performances, comme l'excellent confort thermique, la bonne inertie et le caractère hygroscopique du matériau ainsi que son empreinte environnementale sont pour eux les avantages principaux. L'autre qualité soulignée étant la grande adaptabilité sur chantier surtout en ce qui concerne les LDB, par rapport à d'autres solutions requérant des compétences plus spécifiques. Le mieux-être des poseurs sur chantier employant ces solutions a également été souligné chez H. PIGUILLEM : « *Au niveau du chantier, la différence est énorme. L'ambiance d'un chantier réalisé avec des matériaux biosourcés n'est pas du tout la même que celle d'un chantier plus traditionnel.* »²⁶

²⁶ Annexe 4 : Entretien réalisé avec l'architecte Henry PIGUILLEM

Certains défauts techniques, comme les émanations de poussière élevées lors des découpes ou les effets de tassements des LDB les plus souples, représentent selon eux des défauts à considérer. L'un des principaux freins à leur emploi reste la difficulté de trouver des artisans compétents dans la pose de ces produits et proposant donc des devis corrects.

Globalement, les architectes estiment que le grand public prend progressivement conscience des enjeux environnementaux, il est beaucoup plus réceptif qu'il y a 15 ou 20 ans au discours promouvant un matériau écoresponsable, surtout lorsqu'il concerne son habitat personnel, mais un travail d'explication important reste à chaque fois nécessaire. Certains aprioris concernant la résistance du matériau au feu, ses performances ou sa longévité ainsi que la perception d'un prix plus élevé sont généralement autant de freins entravant son approbation. Le prix d'achat plus élevé que celui d'autres solutions est un frein secondaire pour H. PIGUILLEM, dont il attribue la différence à la marge très élevée des fabricants mais que les qualités « non marchandes » du matériau peuvent compenser.²⁶ Au contraire, E. MIGNOT considère que « *les prix des F-LDB ont beaucoup diminué, le matériau devient compétitif, l'argument d'un prix plus élevé pour ne pas les employer de manière plus conséquente n'est plus valable* ». ²⁷ Le manque d'intérêt, ou de connaissance des autres acteurs, reste pour eux le frein principal. Les deux architectes sont globalement très favorables à un recours plus systématique aux F-LDB et, plus généralement, aux biosourcés dont ils défendent les intérêts sur chaque projet. Les deux architectes se rejoignent pour souligner que cette solution isolante sera amenée à se développer dans les années à venir.

2.2.1.2 Le point de vue des poseurs :

Les deux artisans poseurs interrogés avaient également l'habitude de travailler avec les F-LDB qu'ils considéraient comme la solution biosourcée à privilégier en soulignant leurs qualités thermiques et hygroscopiques. Outre les dégagements de poussière importants, les poseurs ont constaté d'autres défauts durant la mise en œuvre : la découpe désagrégeant certaines LDB les moins denses et le poids élevé de certaines FDB, peuvent en rendre plus pénible la mise en œuvre. Les différences dans l'impact sanitaire avec des matériaux plus irritants comme les laines minérales ont été vivement soulignées chez chacun d'entre eux. Le prix reste cependant pour eux un frein majeur à l'emploi de cette solution, surtout pour les FDB. S. BOULE précise « *Nous n'avons recours aux FDB que sur demande du client, leur prix encore élevé étant désavantageux. Habituellement, dans le cas d'une ITE, nous mettons en place une ossature avec des montants et traverses croisés afin de minimiser les ponts thermiques, en utilisant seulement des LDB,* ». ²⁸ Les mêmes problèmes liés au manque de sensibilité ou de connaissance du maître d'ouvrage et le travail d'argumentation nécessaire ont été évoqués. Les projets sur lesquels les poseurs travaillaient habituellement étant l'habitat individuel unifamilial aussi bien en construction neuve qu'en rénovation, et sans avoir recours à un architecte.

²⁷ Annexe 3 : Entretien réalisé avec l'architecte Estelle MIGNOT

²⁸ Annexe 2 : Entretien réalisé avec l'artisan poseur Sylvain BOULE

2.2.1.3 Le point de vue des représentants des fabricants :

Les entretiens réalisés avec les représentants commerciaux s'avéraient être les plus approfondis, en raison de leur très bon degré de maîtrise des aspects techniques, économiques et environnementaux liés au matériau et à sa filière. Leur discours étant cependant fortement orienté en faveur du matériau en raison de leur positionnement commercial, leurs appréciations nécessitent certaines nuances. Les atouts qu'ils ont attribués aux F-LDB sont les mêmes que ceux des acteurs précédents en y ajoutant le caractère durable de la ressource utilisée et de la fin de vie. Selon F. JOSCHT : « *Pour la fabrication de nos panneaux isolants, nous n'utilisons que du bois de seconde main, le même que celui de l'industrie papetière et pouvant être considéré comme un déchet forestier, nous avons une très grande marge vis à vis de la ressource disponible* ». ²² Cette affirmation sera nuancée dans la partie III.

Plusieurs freins empêchant la progression de la part de marché ont été évoqués. Selon F. JOSCHT, les prix plus élevés des F-LDB sont liés à la répercussion du coût élevé de la Recherche et Développement mais ne représentent pas un frein selon lui : « *comme dans de nombreux domaines, un matériau de qualité supérieure aura un prix supérieur. C'est un positionnement que notre entreprise assume parfaitement.* » ²² La part encore faible des FDB s'explique selon les deux représentants, par le manque de connaissance, qu'il s'agisse de trouver des artisans compétents n'augmentant pas leur devis ou des maîtres d'œuvre intégrant les qualités non marchandes (hygrométrie, inertie, biodégradabilité) dans leurs simulations en amont de leur prise de décision. L'autre frein est la culture constructive en ITI complètement étanche à la vapeur d'eau et court-circuitant donc l'intérêt hygroscopique des F-LDB.

Les deux représentants soulignent donc le rôle clé des maîtres d'œuvre dans la promotion des solutions biosourcées et reconnaissent qu'une amélioration lente mais régulière de la prise en considération de ces problématiques par les acteurs du bâtiment s'opère.

2.2.1.4 Mise en relation de ces appréhensions :

Chacun des acteurs a reconnu à la fois une augmentation de la part d'emploi des isolants biosourcés et particulièrement des F-LDB, en raison d'une sensibilisation croissante du grand public aux problématiques environnementales, d'une visibilité plus grande de ces matériaux et de leur prix devenu attractif. Il reste cependant de grands progrès à faire. Tous ont souligné les qualités non marchandes : confort thermique et hygrométrique, aspects sanitaires, caractéristiques durables, comme autant d'éléments devant être pris en compte dans la réflexion amenant au choix d'un matériau et compensant un prix jugé encore trop élevé. Le prix et le manque de connaissances techniques ou de considération des acteurs sont les deux freins ressortant systématiquement.

Il est intéressant d'observer que chaque acteur se dit conscient de ces problématiques et attribue la responsabilité de la présence de ces freins au manque de connaissance ou de positionnement des autres acteurs ou du maître d'ouvrage. Mis à part les représentants des fabricants, tous ont évoqué le rôle clé du positionnement du maître d'ouvrage dans la prise de décision et du travail d'explication et d'argumentation nécessaire des maîtres d'œuvres, parfois infructueux, afin de les convaincre des qualités offertes par cette solution isolante.

Le manque de connaissances se traduit par la présence de préjugés : matériaux facilement inflammables, putrescibles ou moins performants que leurs homologues ainsi qu'à la non prise en considération des qualités non marchandes offertes par le matériau, le choix du matériau isolant utilisé étant souvent déterminé par un paramètre unique n'examinant que le coût initial de la construction : le ratio prix/performance.

L'un des freins évoqués par les fabricants est le manque de formation des poseurs, engendrant deux conséquences directes :

- Un recours systématique à des solutions conventionnelles auxquelles les poseurs sont généralement habitués.
- Un coût des prestations de pose des F-LDB surévalué par les prestataires appréhendant des difficultés de pose supplémentaires, ce dernier point nuisant encore davantage à l'attractivité commerciale du matériau.

Certains fabricants proposent cependant des formations de quelques jours afin de maîtriser la mise en œuvre de leurs produits. Les entretiens ont également révélé que le monde de la construction se veut particulièrement résistant face aux changements et ne s'approprie donc pas facilement des solutions nouvelles. Tous les acteurs se rejoignent néanmoins sur un point : l'augmentation actuelle du recours à cette solution devrait se prolonger probablement dans les années à venir.

Par ailleurs, les entretiens révèlent tous une grande disponibilité et donc aucun problème d'approvisionnement des F-LDB, autrefois vendues par des distributeurs spécialisés dans les éco-matériaux, elles trouvent désormais leur place dans plusieurs distributeurs de matériaux généraux. Cette disponibilité accrue permet de réduire la frontière entre maître d'œuvre / d'ouvrage et le matériau et donc de favoriser son utilisation.

2.2.2 LES F-LDB, POUR QUEL TYPE DE PROJETS ?

Afin de déterminer le rôle des paramètres constructifs intégrant les F-LDB, se pose la question du type de projet et du procédé constructif auquel le matériau est généralement associé. Cette analyse permet de déterminer si la dynamique de la culture constructive actuelle est favorable aux F-LDB. Il n'existe pas, à ma connaissance, de source faisant mention des parts d'emploi des isolants par rapport à un procédé constructif ou par rapport à un type de bâtiments à l'échelle nationale. Des éléments peuvent être obtenus par les réponses des acteurs aux questions suivantes :

- *En complément de quel système constructif les F-LDB sont elles généralement prescrites, y a t'il des incompatibilités ?*
- *Pour quel type de projet et de maître d'ouvrage sont elles généralement prescrites ? Habitat individuel, collectif, maîtrise d'ouvrage publique, tertiaire ou agricole ?*

2.2.2.1 F-LDB et systèmes constructifs :

Les entretiens ont confirmé que les F-LDB présentent des caractéristiques performantes et complémentaires lorsqu'elles sont associées avec les ossatures bois. Or, concernant l'habitat individuel, les ossatures bois porteuses ne représentent que 5% à 12%, selon les régions, du marché de l'habitat individuel neuf et entre 1% et 9% de l'habitat collectif. Même s'il existe de grandes disparités sur le territoire, cette part de marché ne connaît pas de progression significative, dans le secteur non résidentiel, à l'exception des secteurs agricoles et tertiaires. En outre, pour l'année 2016, la part de marché de la construction bois neuve s'élève à 7,8% pour le logement et à 16,7% pour le secteur non résidentiel, à l'échelle nationale.²⁹ Chacun des acteurs souligne que les F-LDB sont compatibles avec n'importe quel type de support porteur (pierre, brique béton, ossature bois, CLT....)

Les FDB sont très majoritairement posées en ITE, ce qui implique un recours à ce type d'isolation encore minoritaire en France. Selon l'étude de marché réalisée par TBC, La part de l'ITE, malgré une forte augmentation surtout dans le cadre de la rénovation jusqu'en 2013, semble s'être actuellement stabilisée pour ne représenter que 25% des m² d'isolation posée à l'échelle nationale.³⁰ Les entretiens pointent une forte persistance de l'ITI malgré les limites inhérentes à ce procédé : ponts thermiques au niveau des raccords horizontaux et verticaux et perte des qualités de l'inertie du bâtiment. Selon F. JOSCHT²², « *Le problème de la culture constructive en ITI, est qu'elle court-circuite les qualités hygrométriques et de l'inertie thermique des F-LDB, et donc l'intérêt qu'il y a à les employer sur un projet* ». ²² Les systèmes en ITE, systèmes constructifs plus « aptes » à intégrer des F-LDB restent donc minoritaires sur le territoire. Les F-LDB étant compatibles avec un grand nombre de supports, ne sont donc pas exposées à une problématique majeure liée au système constructif choisi, même si la culture de l'ITI, étanche à la vapeur d'eau dominante, rend caduques les qualités hygroscopiques des LDB et, par définition, n'intègre la plupart du temps pas de FDB.

²⁹ Enquête nationale de la construction bois : Activité 2016 – CODIFAB, Paris, 2017 – p 3 à 6.

³⁰ Les isolants thermiques pour le bâtiment en 2017 en France – TBC (Extrait), Toulouse, 2017 – p. 5 à 8

2.2.2.2 F-LDB et type de projet :

Qu'il soit privé ou public, nous l'avons vu, le maître d'ouvrage reste un acteur clé dans la prise de décision. Selon les entretiens, c'est dans le cas de l'habitat unifamilial, où le maître d'ouvrage peut être très impliqué dans les choix et la réalisation des travaux que les F-LDB sont les plus employées. Cette orientation peut en partie s'expliquer par la nature de la réglementation incendie empêchant ou contraignant le recours à des isolants inflammables ou fortement inflammables pour les ERP ou les bâtiments ayant une hauteur conséquente. L'artisan poseur H. PINCE évoque également la raison suivante : *« les intérêts du maître d'ouvrage ne sont pas les mêmes pour chaque classe d'usage du bâtiment : un promoteur ou même une maîtrise d'ouvrage publique accorderont plus d'importance à la diminution des coûts liés à la construction des ouvrages. Certaines économies sont donc souvent réalisées sur le gros-œuvre invisible, contrairement au propriétaire privé pour qui la qualité des matériaux constituant son habitat importera davantage. »*¹¹

Cependant, ces 5 dernières années, des ERP sous maîtrise d'ouvrages publics ont été réalisés en intégrant des F-LDB. Selon J. KENNELY¹⁰ *« Une étude de faisabilité d'un bâtiment public intégrant une isolation biosourcée est obligatoire, mais la maîtrise d'ouvrage en tiendra compte ou non dans le cahier des charges final qu'elle émettra. »* De plus en plus de références d'ERP (Etablissement Recevant du Public) de grande ampleur intégrant les F-LDB sont répertoriées sur le territoire comme le lycée Sud Loire à Clisson ou l'Université de Strasbourg.³¹ Il s'agit souvent d'une intégration des F-LDB partielle, complétée par d'autres isolants biosourcés ou minéraux.

On peut donc distinguer deux types d'usage : l'un plus « traditionnel » et dominant se faisant sur des projets à l'échelle de l'habitat individuel, nécessitant un engagement important du maître d'ouvrage, mais n'ayant que très peu recours à des études comparatives précises permettant d'orienter la prise de décision. L'autre, une application plus récente sur des projets de maîtrise d'ouvrage publique, encore minoritaires, mais possédant le mérite de développer une communication importante envers le grand public autour de la mise en place de ces solutions et de bénéficier d'analyses comparatives plus poussées, à l'échelle de la durée de vie du bâtiment.

Néanmoins, ces projets ainsi que les produits FLDB qui y sont intégrés nécessitent souvent des adaptations techniques afin de répondre aux règlements incendies, que se soit dans la préfabrication de modules hermétiques ou dans la pose d'écrans coupe feu spécifiques. Notons que la réalisation de telles études implique un coût important, discriminant, là encore, les projets aux capacités d'investissements limitées.

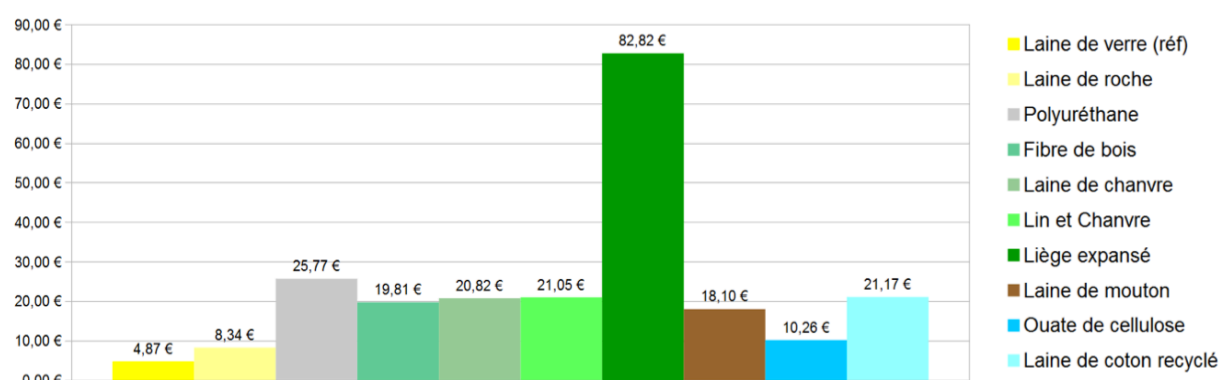
¹¹ Annexe 1 : Entretien réalisé avec l'artisan poseur Henry PINCE

³¹ Site internet : Références – PAVATEX – : <https://www.soprema.fr/fr/article/reference/lycee-sud-loire-de-clisson-concept-d-energie-positive>

2.2.3.1 Comparaison des prix de différentes solutions isolantes :

Le potentiel de développement d'un matériau passe inévitablement par le filtre de son prix, relativement aux autres solutions, même si celui ci comporte un aspect fortement évolutif. Le CEREMA (Centre d'Expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) dresse une analyse comparative basée sur le prix moyen distributeur HT du matériau pour une UF (Unité Fonctionnelle) de $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{k/W}$.³²

Les données manquantes au graphique suivant, relatives aux FDB, peuvent être complétées par la moyenne de 3 produits concurrents. Ainsi, on obtient un prix HT représentatif de 41 € pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{k/W}$ pour un produit FDB de densité intermédiaire par moyenne des produits : *Multisol* (ISONAT), *Steico intégral* (STEICO) et *Pavatherm* (PAVATEX). Celui des FDB pare-pluie les plus denses, obtenu par moyenne des produits : *Duoprotect* (ISONAT), *Steico Spécial* (STEICO) et *Diffutherm* (PAVATEX) s'élève à plus de 67 € pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{k/W}$ après déduction de 20% de la TVA sur la base des prix d'un fournisseur commun³³.



Graphique 10 : prix moyens distributeurs HT de certaines solutions d'isolation en 2016 pour $R = 5 \text{ m}^2 \text{ k/W}$

Cette source ne prend cependant pas en compte le prix de la mise en œuvre, pouvant influencer l'analyse comparative. A l'exception des panneaux de liège expansé et des FDB, il apparaît que les isolants biosourcés possèdent, de part leur composition et leur procédé de fabrication similaires, une gamme de prix relativement homogène, restant tout de même 3 à 4 fois supérieure au prix moyen des isolants minéraux. Les prix liés à la ouate de cellulose présentés dans ce graphique étant cependant à relativiser. En effet, les valeurs obtenues sont représentatives d'un conditionnement en vrac, celles d'un panneau en ouate semi rigide (ISONAT *Univercell*) à l'application similaire aux LDB s'élevant, pour $R=5$ à 23,62 € HT.³³ Les entretiens menés font état, de manière unanime, d'un prix des LDB s'inscrivant dans la moyenne des biosourcés végétaux et voyant son attractivité augmenter par rapport aux produits synthétiques, notamment le polyuréthane.

³² A. PUILLAUE – *Le coût des matériaux biosourcés dans la construction* – CEREMA, 2017 – p. 14

³³ Site internet – Matériaux naturels – Disponible sur : <https://www.materiauxnaturels.fr/search?q=fibre+de+bois>

En effet, les progrès liés à la R&D ont permis d'aboutir à une diminution progressive du prix comme le souligne F. JOSCHT : « *La Recherche et Développement nous a permis de diviser le prix des F-LDB pratiquement par deux depuis le début de leur production sur le territoire.* »²²

Néanmoins, les FDB les plus denses, présentant de nombreuses similitudes techniques avec les panneaux en liège aggloméré, connaissent un prix HT 3.5 fois plus élevé que l'ensemble des biosourcés végétaux pour une résistance thermique équivalente. Il semblerait donc qu'il y ait une forte corrélation entre les prix 2 à 3,5 fois plus élevés des FDB, par rapport aux LDB, et la quantité d'énergie plus importante liée à leur fabrication, présentant un écart de nature similaire comme nous le verrons dans la partie III. Cet écart très sensible de prix pour une résistance thermique « *R* » équivalente des FDB est donc, sans nul doute, l'élément limitant le plus le potentiel à venir des FDB. Néanmoins, cette UF présente un caractère susceptible de défavoriser les FDB injustement car, en pratique, le matériau n'a pas pour vocation première de jouer le rôle de bouclier thermique mais de compléter une autre solution d'isolation par un support continu ITE ou bien de répondre à des champs d'application plus spécifiques (sarking ou ITE de très faible épaisseur). Son prix sensiblement plus élevé pour cette unité fonctionnelle ne doit donc pas être injustement interprété.

2.2.3.2 Considérations sur le prix à l'échelle de la durée de vie du bâtiment :

Les entretiens réalisés ont évoqué à plusieurs reprises que la seule prise en compte du prix pour le coût de construction omet plusieurs paramètres et n'est donc pas représentatif. En effet, une série d'éléments que l'on peut considérer, si l'on étudie comparativement les solutions isolantes sur toute la durée de vie du bâtiment, vient nuancer le coût initial, pouvant être plus élevé, des F-LDB. Premièrement les investissements nécessaires à la mise en œuvre de l'isolation du bâtiment, quelque soit l'isolant choisi, sont dans la plupart des cas, compensés par les économies d'énergie de chauffage réalisées sur une période d'amortissement allant généralement de 8 à 12 ans selon O. Sidler.³⁴

De plus, outre les gains liés au confort thermique l'énergie grise ainsi que le bilan CO₂ valorisant les matériaux biosourcés sont autant de valeurs « non marchandes » ou difficilement évaluables, méritant d'être prises en considération. A ce titre, Les F-LDB peuvent faire l'objet d'une revalorisation énergétique en fin de vie et conservent, dans tous les cas, un coût de destruction inférieur à celui des solutions synthétiques et minérales généralement employées, comme nous le verrons dans la partie III. Ces caractéristiques restent difficiles à évaluer et leur modélisation appliquée pour un projet peuvent générer des coûts supplémentaires défavorisant encore l'attractivité des F-LDB.

Enfin F. JOSCHT rappelle : « *l'isolation thermique ne représente que 2% à 5% du budget total de la construction d'un projet.* ». Si l'on prend en considération ces proportions, le prix d'une solution isolante en LDB par rapport à celui d'une laine minérale, engendrera un surcout compris entre 1% et 2% du prix de construction. Bien que l'écart de prix soit présent, il reste nécessaire de le relativiser par rapport au budget global.

³⁴ SIDLER Olivier – *La rénovation thermique des bâtiments* – Enertech, Mèze, 2012 – p.108

Les acteurs interrogés reconnaissent unanimement que les F-LDB possèdent des qualités spécifiques au niveau de l'inertie thermique, de l'hygrométrie. A l'image des autres solutions biosourcées, elles possèdent de bonnes caractéristiques de durabilité environnementale. Les entretiens n'ont pas révélé de problèmes techniques supplémentaires que ceux évoqués en Partie 1. Bien que le grand public et les acteurs du bâtiment montrent un intérêt croissant vis à vis des éco-matériaux, il existe encore de nombreuses réticences entretenues par une certaine difficulté à amorcer un changement des habitudes dans la mise en œuvre du bâtiment. Tous les acteurs se rejoignent néanmoins sur le fait que cette solution sera amenée à se développer dans les années à venir.

Les F-LDB, étant compatibles avec un grand nombre de support, la culture constructive du pays ne semble pas être un frein prépondérant, mise à part la grande persistante de l'ITI, susceptible de les défavoriser. Selon la nature des projets réalisés par les acteurs interrogés et selon leur discours, le matériau reste largement prescrit dans le domaine de l'habitat individuel même si une application récente, plus médiatisée et au potentiel intéressant sur les ERP ou autres projets de grande ampleur, voit le jour.

Le frein principal à un emploi plus conséquent reste donc, selon eux, lié à un manque de connaissances ou de compétence des acteurs : principalement la difficulté de trouver des poseurs qualifiés et la méthode réductrice de prise de décision ne prenant pas en compte les caractéristiques à l'échelle de la durée de vie du bâtiment ainsi que des spécificités du matériau. Néanmoins, des études comparatives prenant, par exemple, en compte l'énergie grise et l'impact carbone des bâtiments tout au long de leur durée de vie, encadrant les projets de maîtrise d'ouvrages publics, sont de plus en plus poussées et encadrées au niveau réglementaire. Cependant, le coût élevé peut nuire à leur démocratisation sur des projets à l'échelle plus modeste.

Le manque de connaissances évoqué plus haut se traduit par la conviction d'un prix plus élevé des matériaux biosourcés. Cela reste vrai, selon le CEREMA, si on le compare avec celui des laines minérales. Or, le prix des LDB reste dans la moyenne des isolants végétaux pour des performances similaires et moins cher que le polyuréthane. Cependant, les FDB possèdent, pour une résistance thermique équivalente, un prix 2 à 4 fois plus élevé selon la densité des panneaux, et un prix pour l'unité panneau, variable selon les épaisseurs, également plus élevé. A cela s'ajoute un prix de pose des ITI plus important, lié à une technique plus complexe venant encore défavoriser le matériau. Ce critère affectant de manière conséquente leur potentiel de développement à venir.

Les prix communiqués restent donc à relativiser : premièrement, ce prix d'exécution ne prend pas en compte, au même titre que la réglementation, certains paramètres (inertie, hygrométrie, faible coût en fin de vie) offrant une plus value importante dans la plupart des simulations qui sont réalisées. Deuxièmement, les écarts avec des solutions moins onéreuses sont à relativiser, par rapport au coût total de construction.

2.3 ASPECTS POLITIQUES, LÉGISLATIFS ET LABELS

2.3.1 LA POLITIQUE PUBLIQUE DANS LE DOMAINE DE L'ISOLATION

En France, l'isolation du bâtiment est un enjeu majeur au premier plan dans la transition énergétique du pays, étant donné le poids important de la consommation de ce secteur au niveau national. La rénovation du parc immobilier existant semble constituer l'enjeu le plus important : 66% du parc immobilier français a été construit avant la première réglementation thermique de 1974 et, donc, avant l'intégration de dispositifs isolants performants³⁵. De plus, les performances thermiques du parc construit sous la contrainte des premières RT 1974 et RT82 sont bien en deçà des exigences actuellement en vigueur et donc susceptibles de nécessiter une mise en conformité.

En 2013, 66 % des logements ont une classe de consommation D (supérieure à 150 kWh/m²/an) et donc éloignés de l'objectif BBC-standard-rénovation de 80 kWh/m²/an, pour l'ensemble du parc immobilier français, fixé par le gouvernement lors du Grenèle de l'environnement de 2007 pour l'horizon 2050. Atteindre cet objectif supposerait la mise en conformité de 2% du parc immobilier par an soit, annuellement, 550 000 logements pour un rythme en 2012 de seulement 0,5%.³⁵ Dès lors, se pose la question de la mise en adéquation des objectifs fixés par le gouvernement avec les contraintes opérationnelles de terrain, qu'il s'agisse du développement des filières concernées ou de la disposition des maîtres d'ouvrage à consentir à des opérations allant dans le sens de ces objectifs.

L'Etat a donc mis en place des incitants à destination des particuliers ainsi qu'un cadre réglementaire évolutif au contenu de plus en plus exigeant pour la construction neuve, puis, plus récemment, la rénovation, où il est désormais obligatoire de procéder à une isolation des locaux dans le cadre de travaux conséquents, pour une performance moyenne de $R = 2.5 \text{ m}^2 \cdot \text{k/W}$ des parois.³⁶

Cependant, le rapport de Olivier SIDLER (2012) souligne que la volonté pour certains maîtres d'ouvrage d'entreprendre leurs travaux d'isolation seuls, sans études et avis techniques et/ou un degré de maîtrise suffisant des procédés de chantiers, peut conduire à une opération inefficace. A cela s'ajoutent la pénurie ou le caractère atomisé des artisans, ou encore le fait de différer temporellement une partie des travaux, dédoublant ainsi une partie des frais nécessaires à l'opération. Le cadre législatif et incitatif se retrouve donc confronté à certaines résistances opérationnelles échappant à son contrôle.³⁷

³⁵ A. RUDINGER – *La rénovation thermique des bâtiments en France et en Allemagne : quels enseignements pour le débat sur la transition énergétique ?* – Science Po, Paris, 2013 – p. 5 et 6

³⁶ Quand devez vous isoler ? – ADEME, Paris, 2018 – p. 5

³⁷ O. SIDLER – *La rénovation thermique des bâtiments* – Enertech, Mèze, 2012 – p. 34 à 40.

2.3.2.1 Les incitants destinés aux particuliers :

Lorsque les particuliers entreprennent des travaux d'isolation dans le cadre d'une rénovation, le principal outil mis à disposition des particuliers est le CITE (Crédit d'Impôt pour la Transition Energétique). Il est retenu sur l'impôt sur le revenu et restitué pour les ménages non imposables. Il est attribué à tout particulier à hauteur unique de 30% du montant des travaux pour tout logement principal de plus de deux ans situé sur le territoire français. Il est octroyé pour des travaux d'isolation ou d'équipement de chauffage ou de régulation thermo-hygrométrique de l'habitat. Il s'agit de l'incitant étant capable de valoriser au mieux la politique énergétique souhaitée par l'Etat.³⁸

D'autres aides, comme l'éco prêt à taux zéro souscrit auprès de banques commerciales concernant la construction neuve, ou encore un abaissement de la TVA lié aux travaux de performances énergétiques de 20% à 5,5%, peuvent également être octroyées et cumulables sous certaines conditions.³⁸

Ces incitants s'adressent cependant principalement aux logements et excluent donc une grande partie du secteur immobilier. De plus, le montant des subventions octroyées semble n'avoir que peu d'impact sur la prise de décision d'entreprendre de tels travaux : les copropriétés peuvent obtenir des subventions parmi les plus élevées, comprises entre 50% et 70% du montant des travaux et de la conception mais ont un taux de rénovation énergétique qui n'est pas supérieur à celui des propriétaires individuels.³⁹ La démarche incitative rencontre donc de grandes résistances opérationnelles, que seul un dispositif réglementaire semble pouvoir surmonter. On note cependant l'absence d'incitants nationaux spécifiquement réservés à l'emploi de matériaux biosourcés ou ayant une énergie grise plus faible.

2.3.2.2 Les incitants destinés aux entreprises d'isolation F-LDB :

La situation est complexe car les subventions nationales octroyées pour la production d'un produit « au caractère écoresponsable » semblent être incompatibles avec une consommation d'énergie élevée du processus de fabrication, ce qui est le cas des industries des F-LDB. De plus, la réglementation européenne est prépondérante dans ce domaine et ne semble octroyer des subventions que pour les projets novateurs. Enfin, les régions peuvent accorder des subventions, notamment pour des groupement d'entreprises, mais fortement variables selon les politiques et ambitions régionales. L'entretien mené avec la responsable d'ACTIS fait tout de même état de subventions accordées pour le lancement des sites de production des panneaux F-LDB sur le territoire français, sans en préciser le montant.

³⁸ Site internet – Administration française – Disponible sur : <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F1224>

³⁹ O. SIDLER – *La rénovation thermique des bâtiments : enjeux et stratégies* – Enertech, Mèze, 2012 – p.

2.3.3.1 La Réglementation Thermique 2012 en vigueur et isolation biosourcée :

La problématique de l'isolation dans la construction neuve est confrontée à la réglementation actuelle de La RT 2012 concernant la performance énergétique des bâtiments. Celle-ci n'a cessé d'évoluer en élargissant chaque fois son champ d'application et les exigences techniques des performances à atteindre. Elle s'applique à tout bâtiment neuf nécessitant un permis de construire. Outre la lutte contre les ponts thermiques représentant entre 30% et 40% des déperditions, elle intègre 3 enjeux concernant l'isolation :⁴⁰

- Une exigence d'efficacité énergétique minimale reposant sur une conception bioclimatique
- Une exigence de consommation maximale Cepmax : celle-ci doit être équivalente à une moyenne de 50 kWhep/m²/an, variable selon la latitude et l'altitude des régions.
- Une exigence de confort d'été : La température Tic (température intérieure maximale à atteindre pour 5 jours chauds consécutifs), maximum de 26 °C.

2.3.3.2 La Réglementation Thermique 2020 et isolation biosourcée :

La RT 2020, dont l'entrée en vigueur a été ajournée pour 2025, reprend les mêmes champs réglementaires que la RT 2012, en y augmentant drastiquement le niveau d'exigence, le coefficient Cepmax passant par exemple à 12 kWhep/m²/an. Outre cette très basse consommation exigée, elle devrait y intégrer des paramètres permettant de prendre en compte l'impact environnemental des matériaux de construction selon les paramètres du label E+C-. Les bâtiments neufs devront par ailleurs être à énergie positive (BEPOS) et redistribuer sur le réseau public les surplus réalisés.⁴¹

La législation actuelle intègre la notion d'énergie primaire mais seulement pour les postes alloués à la consommation énergétique du bâtiment en phase d'exploitation (chauffage et ventilation) et non celles des matériaux. De plus, selon J. KANNELLY : « *les paramètres liés au confort thermique comme la bonne inertie ou le caractère hygroscopique du matériau ne sont pas pris en compte dans ces exigences réglementaires ce qui pénalise les F-LDB* ». ¹⁰ La RT 2012 ne comporte donc aucun caractère incitant à l'emploi d'éco-matériaux, mais se focalise uniquement sur les performances énergétiques liées à la vie utile du bâtiment. Toujours pour J. KANNELLY, les exigences toujours plus élevées de la réglementation thermique peuvent avoir un effet pervers sur l'emploi des éco-matériaux : « *Pour compenser le surcoût lié à des épaisseurs plus importantes, les maîtres d'œuvre et d'ouvrages se sont mis à privilégier les solutions les moins onéreuses, comme les laines minérales, au détriment des éco-matériaux* ». La RT 2020 devrait cependant prendre en compte l'énergie primaire liée aux matériaux de construction, et serait donc beaucoup plus favorable à l'intégration d'éco-matériaux dans le bâtiment.

⁴⁰ Site internet – Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire – Disponible sur : https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/recherche?form_build_id=&form_id=solr_query_form&query=RT

⁴¹ Site internet – Plan Bâtiment Durable – Disponible sur : <http://www.planbatimentdurable.fr/experimenter-la-future-reglementation-le-label-e-c-r222.html>

De nombreux labels apparaissent ces dernières années afin de garantir l'efficacité énergétique ou environnementale des matériaux et des bâtiments. Il sont délivrés par des organismes agréés par le COFRAC (Comité Français d'Accréditation) en fonction de la destination du bâtiment. Les trois principaux certificateurs sont CERQUAL pour le logement collectif, CEQUAMI pour le logement individuel et CERTIVEA pour les bâtiments non résidentiels. La plupart d'entre eux certifie un bâtiment répondant à des performances énergétiques plus exigeantes que la RT 2012, sur la base du même mode de calcul.⁴²

Les exigences de ces labels sont évolutives, en concordance avec l'évolution de la réglementation au même titre que les certifications. En effet, les exigences des labels et HPE et THPE en vigueur sous la RT 2005 serviront de support pour la réglementation de la RT 2012. Un grand nombre de ces labels connaissent donc les mêmes limites que celles de la réglementation : le fait de valoriser la transition énergétique au détriment de la transition écologique. Seul 4 labels favorisent explicitement l'intégration d'éco-matériaux dans le bâtiment. Concernant les performances environnementales, le label *Nature Plus*, que l'on retrouve apposé sur certaines F-LDB, certifie que les matériaux sont composés d'au minimum 85% de matière renouvelable et non épuisable à court terme, et ne contenant ou n'ayant recours à aucune substance hautement toxique durant leur fabrication. Le label *E+C-*, fait l'objet d'une actualisation et prend en compte l'énergie primaire des matériaux de construction dans le bilan énergétique sur toute la durée de vie du bâtiment. Les deux certifications les plus couramment utilisées à l'échelle du bâtiment restent la *Démarche HQE* et le label *Bâtiment Biosourcé*.

2.3.4.1 La Démarche HQE (Haute Qualité Environnementale) :

A la différence des autres labels de performances énergétiques, cette certification prend en compte les aspects sanitaires et environnementaux au niveau du choix des matériaux et de leur cycle de vie. La *Démarche HQE* n'est pas normative mais fonctionne selon un système d'attribution de « points » : 7 points sur les 14 présentés par le label doivent être respectés et au minimum 3 doivent atteindre les exigences du projet le plus performant connu. Ce label est donc le seul à présenter un éventail élargi de critères intégrant d'autres éléments du développement durable comme, par exemple, l'intégration du bâtiment dans la structure paysagère ou encore le cycle de vie et le réemploi possible des matériaux et équipements de construction.⁴³ Cependant, ce niveau de critères élevé implique souvent le recours à des spécialistes (écologues) et à des techniques spéciales supplémentaires limitant donc l'accès de la certification aux budgets restreints. De plus, la multitude des critères due au système d'attribution par « points » complique la comparaison entre les performances des bâtiments certifiés et n'offre donc pas d'étalon de référence clairement identifiable.

⁴² Site internet – Effienergie – Disponible sur : <https://www.energie.org/web/presentation/32-certificateur>

⁴³ Site internet – CERTIVEA – Disponible sur : <https://www.certivea.fr/offres/certification-nf-hqe-batiments-tertiaires-neuf-ou-renovation>

2.3.4.2 Le label Bâtiment Biosourcé :

Ce label est un dispositif réglementaire dont les exigences techniques ont été développées par l'Etat et délivré par les mêmes organismes cités précédemment.

Son objectif est de favoriser l'incorporation en quantités significatives de matériaux biosourcés dans le bâtiment. Il ne peut être octroyé qu'en complément d'une certification HQE, aussi bien pour des matériaux remplissant des fonctions de gros œuvre, que de second œuvre. Son obtention nécessite le respect de trois critères pour lesquels il existe trois niveaux de labels :⁴⁴

- Une exigence quantitative : le taux d'incorporation, un ratio défini par la somme en kg de matériaux biosourcés intégrés au bâtiment divisée par le nombre de m² de surfaces planchers. Ces taux d'incorporation minimum sont variables selon le niveau de label souhaité et la fonction attribuée du bâtiment.
- Une exigence de diversité : la mise en place d'au moins deux produits remplissant des fonctions différentes dans le bâtiment. Pour l'obtention du label aux niveaux 2 et 3, il sera nécessaire d'intégrer au minimum deux matériaux biosourcés différents.
- Une exigence environnementale et sanitaire : les produits doivent avoir une FDES en conformité et doivent être classés A ou A+ au niveau de la qualité de l'air intérieur.

Ce label est complet car il prend en compte aussi bien les aspects quantitatifs, environnementaux, sanitaires et une exigence de variété des matériaux biosourcés utilisés. Cependant, il est attribué uniquement sur vérification documentaire et exclut le champ de la rénovation et de la réhabilitation du bâtiment. De plus, le taux d'intégration minimum est calculé sur la base de la masse en kg de matière incorporée et pénalise donc l'intégration de matériaux légers, comme les isolants. Enfin, le label ne peut être délivré qu'en complément d'une certification HQE ou PEQA, ce qui en restreint les possibilités d'attribution mais en augmente le niveau d'exigence.

2.3.4.3 Limites liées aux labels :

Outre certaines dispositions régionales, les labels sont donc les seuls incitants agréés prenant en compte l'intégration de matériaux écoresponsables dans le bâtiment à l'échelle nationale. Cependant, la réalisation des entretiens apporte deux aspects importants nuisant grandement à leur efficacité. D'une part, ils représentent un coût important pour le maître d'ouvrage, souvent comparable au coût supplémentaire généré par la pose d'une isolation biosourcée en lieu et place d'une solution minérale. Ils ne valorisent donc pas les projets aux capacités d'investissements modestes, le maître d'ouvrage payant deux fois son « engagement écoresponsable ». Deuxièmement, la multitude des labels disponibles, leurs critères spécifiques, et les différents niveaux de certification qu'ils peuvent présenter rendent difficile leur compréhension par le grand public et donc par la maîtrise d'ouvrage privée.

⁴⁴ M. LEPAGE – *Conférence sur le label Bâtiment Biosourcé*, – CERTIVEA, 2014 – Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=2M8UI_TO4r8

L'Etat, en vue de ces objectifs ambitieux, renforce progressivement une réglementation thermique dont la satisfaction des exigences conduit à une augmentation du volume et de l'épaisseur des matériaux isolants et encourage ainsi une stimulation à l'innovation technique visant à en augmenter leurs performances. Même s'il est devenu obligatoire de procéder à une isolation des locaux dans le cadre de travaux de rénovation conséquents, les dispositions réglementaires ainsi que les performances à atteindre restent bien inférieures à celles de la construction neuve.

De plus, l'augmentation des ambitions politiques peut rentrer en dissymétrie avec le nombre et la nature des opérations effectivement réalisées sur le terrain. Certaines dispositions, comme l'obligation d'une performance énergétique minimum à acquérir avant la vente d'un bien immobilier ou dans le cas de travaux de rénovation, offrent des pistes de réflexions intéressantes.

La législation thermique, bien que fixant des objectifs de performance de plus en plus ambitieux propres à dynamiser les filières d'isolation, ne prend actuellement pas en compte les caractéristiques environnementales liées à la nature des matériaux de construction, comme l'énergie primaire nécessaire à leur fabrication et leur élimination, et néglige certains aspects comme l'inertie thermique ou le caractère hygroscopique des matériaux, pour se focaliser principalement sur la performance thermique du bâtiment. Elle ne favorise donc pas, et semble même défavoriser, d'une certaine manière, l'incorporation d'éco-matériaux dans le bâtiment. La RT 2020 devrait cependant prendre en compte le calcul des énergies primaires des matériaux de construction selon les critères du label *E+C-* sur lesquels elle sera fondée.

De plus, il n'existe pas, en dehors des labels dont l'attractivité reste faible, d'incitants nationaux favorisant la construction ou la rénovation en matériaux biosourcés ou à l'empreinte environnementale réduite, ce qui ne favorise pas ces filières alternatives par rapport aux filières conventionnelles. En effet, les coûts sensiblement plus élevés des éco-matériaux ne sont pas compensés par des subventions ou des avantages fiscaux.

Selon les conclusions du rapport de O. Sidler (2012) , les subventions octroyées pour la rénovation énergétique ne constituent pas un argument convaincant. Ainsi, les aspects législatifs, par leur caractère réglementaire, semblent demeurer le levier le plus efficace pour mener une politique en faveur de matériaux à l'énergie grise valorisante devant les incitants et les labels.

PARTIE III

ANALYSE DES CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES PROPRES AUX F-LDB

Afin de déterminer quel est l'impact environnemental et donc la viabilité à long terme de la filière des F-LDB, cette partie s'attachera à l'analyse des caractéristiques environnementales, fer de lance de la communication faite autour de ces matériaux, à travers 3 sous-parties explorant divers aspects liés à l'impact du matériau et de sa filière. De nombreuses données nécessaires à ces analyses étant manquantes chez les fabricants FIBRANATUR et EFIREAL, nous nous concentrerons sur l'analyse des caractéristiques environnementales propres aux 3 fabricants principaux : STEICO, ISONAT et PAVATEX.

Une première sous-partie traitera de la ressource mobilisable par l'industrie liée à la seconde transformation du bois, afin de vérifier si son prélèvement s'inscrit dans une démarche de développement durable. Cette partie analysera donc le type et la disponibilité actuelle et future de la ressource forestière mobilisée pour la fabrication des F-LDB.

Une seconde partie basée sur les déclarations des FDES et DEP émises par les fabricants s'attachera à décrire le cycle ACV du matériau, afin de mesurer quels sont les postes les plus énergivores ou ayant un impact significatif sur l'environnement durant la vie du matériau et pour mettre en évidence les différences que l'on peut observer entre les LDB et les FDB.

Enfin, une troisième partie, sous forme d'étude comparative exploitant les bases de données Baubook et KBOB, nous aidera à positionner le matériau par rapport à ses homologues et donc à vérifier dans quelles mesures l'emploi de cette solution s'avère durable d'un point de vue environnemental. Elle illustrera également les limites inhérentes à l'exploitation de telles données, notamment lorsque celles ci ne prennent pas en compte l'ensemble du procédé constructif.

3,1 ANALYSE DE LA DISPONIBILITÉ DE LA RESSOURCE

3,1,1 NATURE DE LA RESSOURCE FORESTIERE UTILISEE

La gestion de la ressource forestière est une question sensible, par les multiplicités des rôles qu'elle peut jouer au sein d'un territoire et par la fragilité de l'équilibre de ses écosystèmes. Elle ne peut évidemment être réduite à un volume mobilisable par l'industrie du bois et de la trituration. Elle s'avère également, par ses caractéristiques de biodiversité, de croissance différente des espèces, d'accessibilité ou encore de traçabilité, l'une des ressources naturelles dont le volume mobilisable reste très difficile à évaluer. Les marges d'erreur peuvent s'avérer conséquentes, comme le précise le rapport de l'ADEME largement évoqué dans cette sous-partie.¹ Les F-LDB utilisent deux types de ressources forestières dans leur fabrication : le bois directement prélevé en forêt et les PCS (Produits Connexes de Scierie).

3.1.1.1 Le bois directement prélevé en forêt :

Le domaine forestier français est le quatrième d'Europe, il occupe en 2016, selon le service de l'inventaire forestier statistique de l'IGN, une surface de 15,9 millions d'hectares, soit 31% du territoire français. Il s'agit d'une ressource naturelle connaissant une gestion et des prélèvements très encadrés en France faisant l'objet d'une attention permanente. Il est en croissance régulière de 0,7% par an depuis un siècle et demi, et est majoritairement composé de peuplements jeunes lui permettant normalement de supporter une augmentation des prélèvements à venir importante.² Afin d'en chiffrer la disponibilité réelle, Le volume de bois disponible peut être appréhendé sous forme du volume total aérien que l'on peut subdiviser en 3 catégories selon le rapport de L'ADEME :¹

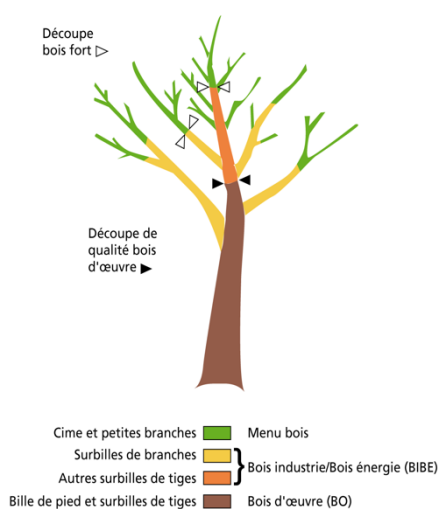


Illustration 10 : Répartition des catégories de bois, selon leurs diamètres, présents dans un arbre.

- Le BFT (Bois-Fort-Tige) c'est à dire le bois sur pied issu de la grume des arbres et ayant un diamètre supérieur à 20 cm, ressource pouvant être valorisée comme BO-P (Bois d'Oeuvre Potentiel).
- Les surbilles de branches ayant un diamètre compris entre 7 cm et 20 cm pouvant être valorisées comme BIBE-P (Bois d'Industrie et d'Energie Potentiel), ressource primaire des fibres de bois.
- Le menu-bois issu des ramifications au diamètre inférieur à 7cm jusqu'à la cime des arbres, pouvant être exploité comme bois énergie mais étant quasi-systématiquement laissé en forêt. Son faible diamètre le rend difficile à valoriser et sa contenance riche en minéraux en font un bon fertilisant, favorisant la croissance des peuplements futurs.

¹ A. COLIN, A. THIVOLE-CAZAT – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, 2016 p. 30

² P. BESSE, H. VALKHOFF, L. FLOISSAC – *Projet de recherche TERRACREA* – Laboratoire de recherche de l'ENSAT, Toulouse, 2014 – p. 12 et 13.

Certains arbres de faible diamètre ne comportent pas de BO-P, ils peuvent être exploités par les industriels en tant que BIBE « libre » sous certaines conditions (âge et structure des peuplements) et concernent près de 40% du volume exploitable³. Pour des raisons de valorisation durable de la ressource forestière, l'étude de l'ADEME considère la possibilité d'exploiter un BIBE-P « libre ». En revanche l'exploitation de BO-P en tant que BIBE n'est pas prise en considération dans les données. Dans la pratique, une part significative du BO de mauvaise qualité reste exploitée en tant que BIBE par les industries de seconde transformation.

3.1.1.2 La ressource en PCS :

Le BFT résineux valorisé en scierie comme BO génère, selon les espèces, entre 35% et 45% de son volume en PCS sous forme de sciurs, plaquettes dosses ou delignures pouvant subir une seconde transformation et étant donc potentiellement valorisables comme BIBE. Cependant, il faut soustraire à ce volume la part des sciurs et écorces, non utilisables pour la fabrication de panneaux isolants.⁴ Ainsi, seuls 54% des PCS sont mobilisables pour la fabrication des F-LDB, ce qui représente environ 20% du volume du BO transformé en scierie.

L'emploi de PCS sous forme de plaquettes, dosses ou delignures est une piste offrant une durabilité intéressante par la revalorisation des sous-produits qu'elle génère et donc par l'économie réalisée sur la matière première, profitant aussi bien aux acteurs de première et seconde transformations. Cette revalorisation par les scieries n'existe que depuis 20 ans en France et leur permet de générer de nouveaux revenus par opposition aux dépenses autrefois nécessaires à leur destruction. Son utilisation pour les panneaux isolants connaît cependant deux limites importantes.

Premièrement, le volume équivalent bois rond exploitable ne correspond qu'à 20% du volume de BO total et, selon un document de l'Agreste (2018), plus de 98% des PCS destinés à la trituration sont déjà commercialisés à destination de la seconde transformation.⁵ Il n'existe donc pas de réserves mobilisables supplémentaires. Deuxièmement, malgré cette nouvelle source de revenu, les scieries consentent à des efforts importants pour réduire la part des PCS liée à leur production en valorisant au maximum l'exploitation de leur matière première. Selon un rapport de l'Agreste (2018), le volume national de PCS résineux en plaquettes commercialisé décroît régulièrement, passant de 2559 milliers de tonnes en 2009 à 1771 tonnes en 2016, soit une diminution très significative de 28% sur cette période.⁵ Le recours aux PCS semble donc trouver ses limites dans la concurrence liée à son exploitation et dans la divergence des intérêts de leur production entre les industries de première et seconde transformations.

³ A. COLIN, A. THIVOLE-CAZAT – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, 2016 – p. 56

⁴ *Approche de la valorisation actuelle des produits connexes de la filière bois-forêt en Lorraine* – ADEME – p. 5

⁵ B. SÉDILLOT – *Récolte de bois et production de sciages en 2017* – Agreste, Paris, 2018 – p. 12

3.1.1.3 Natures des données analysées :

Le rapport de L'ADEME envisage plusieurs scénarios quant à l'évolution de la disponibilité de la ressource dont les variables principales sont la qualité de la gestion sylvicole et l'augmentation de l'activité des filières connexes au bois de première et deuxième transformations. Afin de s'inscrire dans une démarche « réaliste », nous nous appuierons sur l'étude du scénario le plus « raisonnable » où le développement forestier dit de « sylviculture constante » se caractérise par le maintien des pratiques actuelles en termes de gestion sylvicole et où l'activité liée à l'industrie du bois n'augmente que légèrement, dans un contexte économique restant difficile.⁶

La ressource forestière entrant dans la composition des F-LDB est donc caractérisée par les PCS issues du BO à hauteur de 20% et par le BIBE « lié » ou « libre » pour les essences résineuses dont nous analyserons les volumes mobilisables pour un scénario de sylviculture constante.

Le stock forestier peut être divisé en deux catégories : les feuillus, représentant 67% du volume sur pied en 2015 et possédant le potentiel de développement le plus fort, et les résineux dont le volume et le potentiel de développement sont beaucoup plus faibles. Les panneaux isolants sont fabriqués presque exclusivement à partir d'épicéa, de pin sylvestre, douglas et maritime et de sapin dont le volume cumulé correspond à 74% du volume total résineux.⁷

Afin d'évaluer une disponibilité de la ressource concernant la production des F-LDB et tenant compte de ces deux paramètres, un calcul final des disponibilités sera effectué de la manière suivante : $PCS = (20\% \times BO-P) \times 0,74$ et $BIBE-P = (BIBE \times 0,74)$ par rapport aux données concernant la disponibilité forestière nationale dans le rapport émis par l'ADEME

Les informations fournies par les fabricants révèlent que ISONAT et PAVATEX prélèvent leurs ressources en BIBE ou PCS dans des rayons maximums, depuis leur site de production, de respectivement 50 km et 160 km.^{8et9} STEICO ne communique pas ses distances de prélèvement, mais indique un prélèvement local en pin maritime, composant majoritaire de ces produits isolants. F. JOSCHT révèle « *Nous prélevons l'entièreté de notre ressource forestière dans un rayon inférieur à 120 km, non seulement afin de réduire nos émissions de CO₂, mais aussi parce que le transport du bois coûte cher* ». ¹⁰ La ressource étant donc localisée, la balance des importations et des exportations de ces ressources depuis des pays étrangers ne sera pas une caractéristique analysée en profondeur.

⁶ A. COLIN, A. THIVOLE-CAZAT – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, 2016 – p. 23 et 24

⁷ Idem p. 34

⁸ *DEP Panneaux isolants en fibres de bois* – PAVATEX SA, Institut Bauen und Umwelt, Fribourg, 2010 – 24 p. 7

⁹ Site internet – ISONAT – Disponible sur : <https://www.isonat.com/isolation-fibre-de-bois/decouvrir>

¹⁰ Annexe 5 : Entretien réalisé avec le représentant commercial de STEICO SA – Franck JOSCHT

L'IFN estime dans une étude de 2016 que la forêt génère annuellement, en tenant compte du rythme de croissance des peuplements et du taux de mortalité naturelle, un volume national de bois résineux de 15,2 millions de m³ de BO-P et 7,4 millions de m³ de BIBE-P.¹¹ Cette production appelée *disponibilité brute* constitue donc empiriquement le volume maximum exploitable si l'on souhaite s'inscrire dans une gestion forestière durable où la quantité de ressource prélevée est annuellement inférieure à sa capacité naturelle de renouvellement.

Or, Ce volume de *disponibilité brute* n'est pas entièrement mobilisable pour des raisons à la fois de gestion de la biodiversité, techniques, économiques et juridiques. En effet, en plus des pertes directes liées à l'exploitation pouvant atteindre 5% du volume pour le BO et 15% pour le BIBE,⁽³⁴⁾ un défaut d'accessibilité des terrains lié à une densité trop importante des peuplements, une forte déclivité ou un mauvais réseau de dessertes, rendent difficilement exploitables 32% du volume forestier dans son ensemble. D'un point de vue de la gestion forestière, une structure de peuplement ayant un taux de croissance élevé mais étant structurellement trop jeune ou sous-représenté dans le mix de biodiversité souhaité, s'avère également être inexploitable.¹²

Au niveau cadastral, le volume forestier est détenu à 75% par des propriétaires privés dont 93% possèdent des superficies inférieures à 4 hectares, soit 36% de la surface forestière totale.⁽³⁴⁾ Ce grand nombre de propriétaires et leur disposition à rendre mobilisables ou non leurs ressources complexifient les négociations entre acteurs forestiers et industriels. même si des solutions de « regroupements » de propriétaires pour une gestion commune de leur patrimoine forestier existent, comme le précise le rapport de l'ADEME.

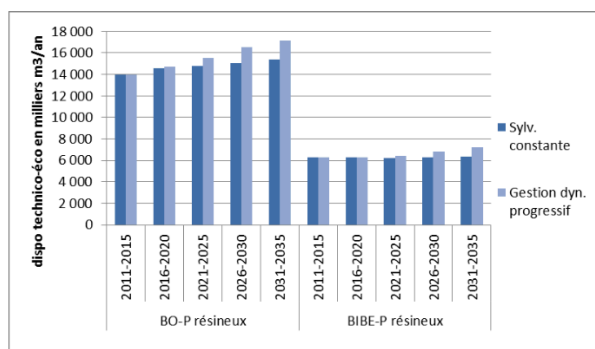
Enfin, de nombreuses obligations environnementales concernant la conservation de la fertilité des sols, le maintien de la biodiversité, des zones ou des espèces protégées viennent encore diminuer cette *disponibilité brute*.¹²

Si l'on soustrait le poids de ces facteurs à celui de la *disponibilité brute*, on obtient la *disponibilité technicoéconomique*. Le taux de réfaction à appliquer reste complexe à déterminer et fortement variable selon les autres paramètres qu'il peut intégrer, par exemple le coût économique de l'exploitation déterminant sa viabilité. Qu'il s'agisse du BO-P ou du BIBE-P, la ressource exploitée annuellement reste généralement inférieure à cette *disponibilité technicoéconomique*, faisant apparaître une *disponibilité nette supplémentaire* non exploitée.¹²

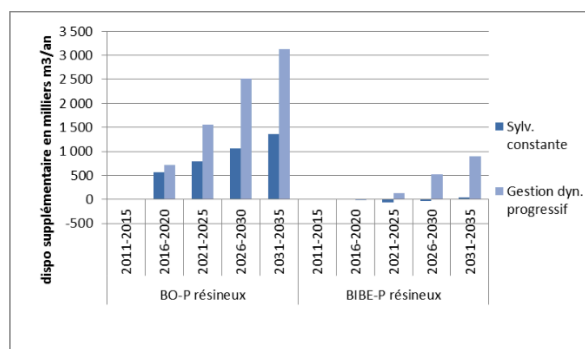
¹¹ A. COLIN , A. THIVOLE-CAZAT – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, 2016 – p. 42 à 57

¹² Idem – p. 42 à 67

Les graphiques suivants reprennent les principales caractéristiques de ces deux derniers types de disponibilité nationale en 2016, à l'échéance 2035, par paliers de 5 ans : ¹³



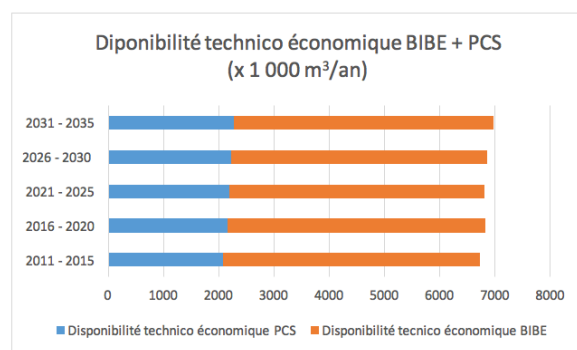
Graphique 11 : Volume de disponibilité technico-économique du bois résineux total selon le rapport de L'ADEME en milliers de m³/an.



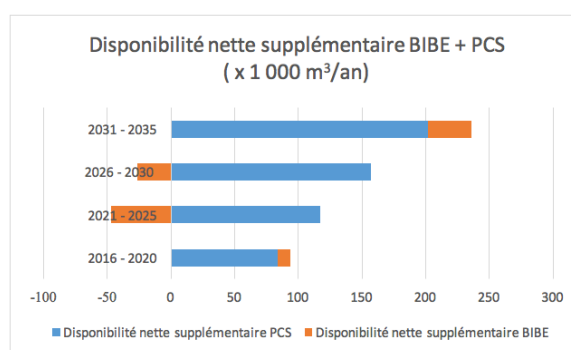
Graphique 12 : Volume de disponibilité nette supplémentaire du bois résineux total selon le rapport de L'ADEME en milliers de m³/an.

En prenant en compte la ressource exploitable pour la fabrication des panneaux :

Soit $PCS = (20\% \times BO) \times 0,74$ et $BIBE-P = (BIBE \times 0,74)$, les données fournies par les graphiques précédents deviennent :



Graphique 13 : Cumul du volume de disponibilité technico-économique des PCS et BIBE entrant dans la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an.

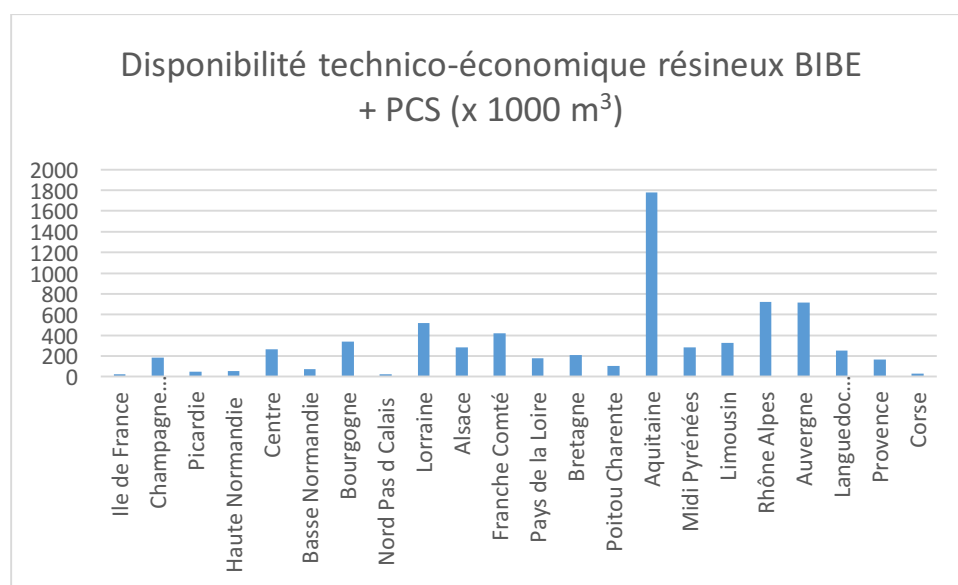


Graphique 14 : Cumul du volume de disponibilité nette supplémentaire des PCS et BIBE entrant dans la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an.

On constate d'abord que la *disponibilité nette supplémentaire* ne représente qu'une très faible part de la *disponibilité technico-économique* de la ressource rentrant dans la fabrication des F-LDB : inférieure à 4 % dans le meilleurs des cas (2035). Autrement dit, il paraît peu envisageable d'augmenter significativement les activités liées à cette ressource. Ensuite, on constate qu'au niveau de la *disponibilité nette supplémentaire*, le volume de PCS est largement supérieur et en augmentation jusqu'en 2035 par rapport à celle du BIBE, cette dernière étant même négative entre 2020 et 2030 (c'est à dire qu'il y aurait plus de prélèvement que la capacité de renouvellement forestière). Cela signifie que les PCS semblent être la ressource offrant le potentiel de valorisation à venir le plus grand même si leur production est en diminution selon le rapport de l'Agreste (2018). Le point d'équilibre entre ressource prélevée et renouvellement naturel semble donc avoir été atteint et même dépassé dans certains cas. Ainsi les industries de seconde transformation comme celles des F-LDB ne semblent pas pouvoir miser sur une augmentation des prélèvements forestiers sous forme de BIBE pour accroître leur activité dans un scénario de sylviculture constante jusqu'en 2035. Il semblerait donc que le secteur ne puisse compter que sur un développement de la production de PCS ou bien sur l'importation de bois étranger dans le cas d'une augmentation rapide de son activité.

¹³ A. COLIN, A. THIVOLE-CAZAT – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, 2016 – p. 61

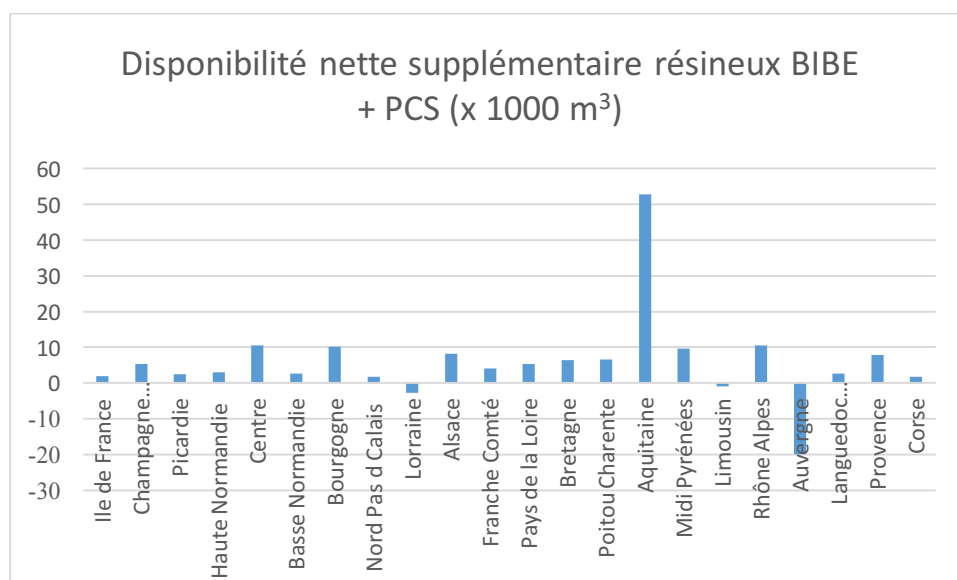
La ressource forestière n'étant pas également répartie sur le territoire, une analyse de la disponibilité régionale s'avère nécessaire pour nuancer ce propos. Afin d'établir un aperçu récapitulatif et représentatif de la ressource forestière disponible pour la filière des F-LDB, les graphiques suivants reprennent les données des disponibilités régionales sur la période 2015 – 2020.¹⁴ Elles cumulent le BIBE-P et les PCS résineux uniquement pour le volume des espèces intégrées à la fabrication des F-LDB. Donc données = $(\text{BIBE} + 20\% \times \text{BO}) \times 0,74$.



Graphique 15 : Cumul par régions des disponibilités technico-économiques en BIBE et PCS résineux intégrés à la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an.

Outre les grandes disparités liées aux différents réservoirs forestiers régionaux, on constate, dans un premier temps, que les régions où sont implantés les trois acteurs principaux de panneaux isolants : STEICO, ISONAT et PAVATEX, possèdent les *disponibilités technico économiques* forestières parmi les plus élevées : respectivement l'Aquitaine, la région Rhône-Alpes et la Lorraine pour le cumul de ces deux ressources. L'implantation des sites de production semble donc directement corrélée à cette disponibilité existante.

¹⁴ A. COLIN, A. THIVOLE-CAZAT – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – Annexe 30A à 31D, ADEME, 2016 – p. 58 à 66



Graphique 16 : Cumul par régions des disponibilités nettes supplémentaires en BIBE et PCS résineux intégrés à la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an.

Cependant, la *disponibilité nette supplémentaire* reste très faible dans chacune des régions, comprise entre 3% et 6% de la disponibilité technicoéconomique et se trouve même être négative dans 3 régions, y compris la Lorraine. Autrement dit, les prélèvements forestiers résineux actuels correspondent sensiblement à la capacité de renouvellement forestière annuelle, sur la période 2015-2020, aussi bien à l'échelle nationale que régionale. Or, le prix des BIBE a sensiblement augmenté ces dernières années au niveau national, ce qui pourrait donc en gonfler la disponibilité, un coût d'exploitation devenant rentable faisant glisser une part du volume de la *disponibilité brute* vers la *disponibilité technicoéconomique*.

Enfin, certaines régions comme la Bourgogne, le Centre ou Midi-Pyrénées présentent des réservoirs potentiels intéressants encore sous exploités. Les chiffres élevés de l'Aquitaine sont influencés par la tempête Klaus de 2009 ayant généré ponctuellement un volume de bois disponible très conséquent dont les stocks n'ont été épuisés qu'en 2016.¹⁵ Cette disponibilité élevée a pour conséquence directe une diminution très forte de la disponibilité à venir en pin maritime, principale ressource employée par STEICO.

Même si les estimations réalisées par l'ADEME peuvent présenter un caractère approximatif, notamment des écarts allant jusqu'à 25% entre le volume prélevé estimé et les volumes effectivement enregistrés, l'étude montre que la disponibilité en BIBE résineux a atteint ou même dépassé son point d'équilibre dans le ratio prélèvement/régénération avec, dans le meilleur des cas, une disponibilité supplémentaire inférieure à 10%, mais souvent un solde neutre ou même négatif notamment dans l'une des régions des sites de production des panneaux isolants. Non seulement ce constat se répercute sensiblement, avec quelques disparités, au niveau régional, mais aucune perspective d'augmentation de la disponibilité supplémentaire des bois résineux n'est envisagée à l'échéance 2035.

¹⁵ A. Antoine, A. THIVOLE-CAZAT – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, 2016 – p. 25

La communication des fabricants et les entretiens ont révélé des stratégies différentes selon les acteurs. STEICO se refuse à employer des PCS en raison, selon F. JOSCHT de la « *difficulté de certifier la provenance et la qualité du bois et des essences qui y sont intégrées. Nous utilisons du bois aux diamètres variables mais de moindre qualité, pouvant servir de ressources pour l'industrie papetière en dernier recours mais absolument pas comme bois d'œuvre.* ».¹⁶ PAVATEX affirme employer presque exclusivement des PCS dont elle mutualise l'acquisition avec une industrie papetière située à proximité de son site de Golbey.¹⁶ Enfin ISONAT utilise 90% de matières premières sous forme de PCS.⁹ J KENNELLY confirme que « *L'utilisation de PCS permet de mutualiser les efforts liés au défibrage entre les scieries et les industriels, elle représente donc une matière première ayant un coût moins élevé que le bois d'œuvre.* »¹⁷

On constate donc que 2 industriels sur les 3 privilégient l'utilisation de PCS par rapport au BIBE. Cette ressource présente effectivement l'avantage de mutualiser les coûts liés à la trituration et donc de générer un cercle économique vertueux entre les acteurs. Or, même si elle est caractérisée par un fort potentiel à venir lié à une augmentation de la disponibilité nette supplémentaire du BO-P résineux, sa production actuelle en forte baisse pourrait générer une augmentation de leur prix. Tous les industriels se rejoignent pour souligner que la disponibilité de ces ressources mobilisées ne pose pas de problème particulier, actuellement et dans le futur. Cette observation reste vraie dans la mesure où il n'y a pas une augmentation de l'activité des secteurs ayant recours à ces deux ressources.

Le rapport de Nomadéis (2012) estime néanmoins que la production française des LDB et FDB cumulés nécessite 34 000 tonnes de bois en 2012.¹⁸ Si l'on considère une augmentation de 10% par an du volume produit, ce chiffre est porté à 52 000 tonnes pour l'exercice 2017. En considérant une masse volumique moyenne du bois résineux de 700 kg/m³, le volume nécessaire à la fabrication supposé de 2017 serait de 72 000 m³ équivalent bois rond, soit seulement 1 % du volume de la disponibilité *technico-économique* de la ressource entrant dans la fabrication sur la période 2015 -2020 selon le graphique 8 ! De manière plus précise cela correspond à 2,5% du volume de disponibilité *technico économique* de BIBE + PCS exploitable prélevé en cumulant les régions où sont implantés les trois principaux sites de production. Cela reste néanmoins près de 70 % du volume de la ressource nette supplémentaire sur cette même période, ce qui démontre la faible marge d'augmentation possible. Même si ces pourcentages expriment un ordre de grandeur et non une statistique officielle, la très faible part de matière première utilisée dans la fabrication de panneaux isolants sur l'ensemble des secteurs de la seconde transformation viennent relativiser les observations précédentes quand à la disponibilité de la ressource.

¹⁶ Site internet – PAVATEX – Disponible sur : <https://www.pavatex.ch/fr/contact/>

¹⁷ Annexe 6 : Entretien réalisé avec le représentant commercial de ISONAT SA– Jérôme KENNELLY

¹⁸ J-M. GROSSELIN (Dir.) - *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction* – Nomadéis, Paris, 2012 – p. 30 et 31

En effet, Cette faible part n'est pas susceptible de jouer un rôle significatif dans la raréfaction et la disponibilité des ressources forestières régionale et nationale, mais reste une contrainte d'un point de vue du développement de la filière.

Enfin, bien que le volume annuel de prélèvement BIBE et BO résineux maximum semble avoir été atteint, la disponibilité future réelle sera déterminée en grande partie par la santé à venir de l'ensemble des secteurs de la seconde transformation restant difficile à évaluer. Le scénario de « sylviculture constante » envisagé par l'ADEME, prévoit, en outre, une légère augmentation des autres secteurs utilisant le bois de trituration pour produire des matériaux de construction et une forte augmentation de ceux produisant du bois énergie d'ici 2035.¹⁹

Il faut tout de même noter que la palette de ressources mobilisables pour cette industrie est plus vaste que celle des panneaux isolants, elle comprend, outre le BIBE, le menu-bois et davantage de produits PCS. La disponibilité à venir dépendra donc, dans une large mesure, de la santé de l'ensemble des acteurs et de leur capacité de négociation pour le partage efficient des ressources afin de satisfaire les besoins de chacun. D'autres paramètres au caractère incertain comme la variation des prix du bois et son corolaire : la balance commerciale des importations et exportations, viennent également nuancer ces conclusions. Cette dernière n'affecte pas, nous l'avons vu, l'industrie des panneaux isolants mais les secteurs connexes et reste donc susceptible de faire varier le volume de la *disponibilité technico-économique*.

Ce constat met en exergue une limite très sensible et incontournable de la ressource forestière pour les industries : contrairement aux autres isolants végétaux dont la matière première est souvent caractérisée par un rendement annuel (paille, lin chanvre...), la ressource forestière n'est exploitable que sur une échelle pluri-décennale , généralement supérieure à 20 ans selon les espèces. Il existe donc une grande dissymétrie entre l'instabilité caractérisant le secteur de production des F-LDB (par exemple l'implantation et la liquidation de ACTIS et HOMATHERM sur un intervalle de 5 ans) et la vision à long terme de l'évolution de la ressource forestière. Cet écart dans l'échelle temporelle pose un problème majeur : la très grande difficulté d'ajuster actuellement la sylviculture forestière afin d'anticiper de manière à satisfaire les besoins en disponibilité future, ainsi que l'impossibilité de développement rapide et significatif des filières connexes du bois résineux sans devoir recourir aux importations.

¹⁹ J-M. GROSSELIN (Dir.) - *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction* – Paris, Nomadéis, 2012 – p. 79 à 86

La gestion durable de la ressource forestière ne peut se résumer qu' à la seule prise en compte de son caractère renouvelable sous forme du ratio quantité prélevée/production naturelle. Les critères de maintien de la biodiversité, de la conservation de la qualité des différents biotopes et du respect des populations animales et humaines y vivant sont autant de critères incontournables à une gestion durable. Les labels de certification forestière durable FSC et PEFC certifient chacun des fabricants de F-LDB : STEICO, PAVATEX et ISONAT produisant des isolants cumulant ou intégrant l'un des deux labels, les produits d'EFFIREAL et FIBRANATUR étant labellisés PEFC.

Malgré leurs limites, ces labels offrent des garanties plus strictes que la réglementation nationale en établissant un cahier des charges précis des éléments à prendre en compte. Ils certifient deux volets différents : la qualité durable de la gestion sylvicole et l'intégration de ce bois certifié dans les industries liées à sa transformation afin de garantir la traçabilité de la matière certifiée, depuis la forêt, jusqu'au produit fini. Ils sont tous deux issus d'organismes internationaux et délivrés par des organismes nationaux certifiés en tenant compte des spécificités de la législation forestière de chaque pays.

3.1.5.1 La certification internationale PEFC :

Ce label, devenu international en 2001, est octroyé par PEFC Council, une ONG internationale indépendante, dans plus de 50 pays et reste, de loin, le premier label de certification forestière française avec 8,2 millions d'hectares certifiés. A l'échelle nationale, les critères précis d'attribution sont variables d'une région forestière à l'autre. Au niveau de la gestion durable des forêts, le label soumet un cahier des charge au propriétaire forestier comprenant des directives concernant :²⁰

- La densité et la diversité des essences par la régénération naturelle ou la replantation.
- L'interdiction de l'emploi de pesticides, d'insecticides ou le dépôt d'autres produits polluants.
- Le respect des cycles de reproduction des espèces pour planifier au besoin les interventions et les replantations.
- Le respect et la valorisation des zones d'eau, du patrimoine paysager et architectural.
- La prise de mesures nécessaires contre la dégradation des sols lorsque les forêts sont soumises à l'exploitation.

Au niveau de la transformation des produits issus du bois par les entreprises, la certification qualifie les produits selon le pourcentage d'intégration variable d'un bois PEFC à l'intérieur du produit fini.²⁰

²⁰ Site internet – Label PEFC France – Disponible sur : <https://www.pefc-france.org>

3.1.5.2 Le label international FSC :

Il a été fondé en 1993 après avoir été introduit au Sommet de la Terre à Rio de Janeiro de 1992. L'Europe possède plus de 48% des forêts certifiées FSC dans le monde. Le label a été introduit par des ONG internationales (entre autre Greenpeace et WWF) et des entreprises de la filière bois. Contrairement au PEFC, la forêt concernée doit préalablement répondre aux critères de labélisation avant l'agrégation, le label PEFC ne garantissant qu'une disposition d'amélioration de la durabilité de la gestion sylvicole. Les contrôles y sont également effectués annuellement aussi bien pour la certification forestière que pour la certification d'entreprises. Enfin, Les critères de certifications y sont plus stricts que pour la certification PEFC, en y intégrant, par exemple, un volet social (conditions de travail lors de l'exploitation et respect des populations autochtones.)²¹

La certification des entreprises sur la base du traçage de la matière y est également plus stricte que la certification PEFC par les pourcentages d'intégration de matière certifiée et l'intégration du recyclage. Le label possède plusieurs niveaux d'attribution intégrant du bois labélisé FSC ou bien du bois recyclé dans des proportions variables mais dont la somme est toujours égale à 100% du bois intégré dans les produits.²¹

3.1.5.3 Limites propres aux labels :

Au début de sa création, il a été reproché au label FSC de ne labéliser que des forêts tropicales, favorisant ainsi l'importation de bois exotiques en Europe ayant une énergie grise liée au transport élevée. Les frais de certification de ces deux labels sont élevés, ce qui défavorise la certification des petits propriétaires forestiers ou des PME, même si des opérations de regroupement sont proposées. Le label FSC présente néanmoins l'avantage d'exiger des critères d'attribution et des taux d'incorporation du matériau plus élevés que le label FSC. Le contrôle pour la gestion des forêts peut comporter de graves lacune en termes de contrôles et d'octrois de certification. Le magazine Cash Investigation a par exemple, réussi à faire certifier PEFC des parcelles non forestières et même urbanisées comme un parking ou encore deux réacteurs de la centrale nucléaire de Cattenom.²²

Enfin, près de 10 millions d'hectares, soit près de 2/3 du volume forestier français sont certifiés par l'un des deux labels. Cependant, la biodiversité à l'échelle nationale, aussi bien chez les feuillus que chez les résineux, est en recul : concernant les résineux, comme cité plus haut, 5 essences représentant 74% du volume résineux, voient leurs pourcentages augmenter, en tant qu'essences principales des peuplements où elles sont recensées, de l'ordre de 3% entre 1981 et 2012 selon L'IGN.²³ Dans les entretiens menés, Jérôme KENNELY souligne : « *même si l'abattement d'un arbre doit être compensé par la plantation d'un autre, le label PEFC ne précise pas que ce dernier soit de la même espèce que le premier* ». ¹⁷

²¹ Site internet – Label FSC France – Disponible sur : <https://fr.fsc.org/fr-fr>

²² Cash investigation : Razzia sur le bois, les promesses en kit des géants du meuble – Emission de télévision animée par Elise LUCET, France 2, 2017.

²³ V. BOUSQUET (Dir.) – Diversité biologique des forêts – IGN, 2015 – p. 189

Même si l'ensemble du domaine forestier croît constamment sur le territoire, la disponibilité technico économique du bois résineux semble être proche de ses limites de prélèvement sans grandes perspectives d'amélioration jusqu'en 2035, aussi bien à l'échelle nationale que régionale. En effet, concernant le BIBE résineux, il n'existe pratiquement pas de ressource mobilisable supplémentaire et même une disponibilité négative dans certains cas jusqu'à cette échéance. Le marché des PCS pourrait s'avérer être une piste intéressante par la démarche durable, profitable à la première et deuxième transformation, dans laquelle ils s'inscrivent. Par ailleurs, la disponibilité nette supplémentaire du BO et donc des PCS qui en sont extraits augmentera progressivement, contrairement au BIBE, jusqu'à l'échéance 2035. Cependant, ce marché est déjà saturé et les quantités produites diminuent, dans l'intérêt des scieries même s'il s'agit encore de la ressource majoritairement employée pour la fabrication des F-LDB. Même si la filière des FLDB n'utilise que 1% du BIBE et des PSC nécessaires à la fabrication des panneaux, il semble donc difficile d'imaginer une augmentation conséquente des activités exploitant la ressource bois sans avoir recours aux importations à l'échelle du territoire.

D'autres paramètres comme le coût économique de l'exploitation, la santé à venir des autres secteurs employant la ressource, l'exploitation assumée ou non de BO comme BIBE ou encore l'imprécision des données collectées peuvent néanmoins nuancer ce constat.

De plus, la filière des F-LDB ne représente qu'une part comprise entre 1% et 3% du BIBE prélevé, ce qui relativise son impact sur la durabilité de la gestion sylvicole. Il existe également une problématique peu soluble, l'adéquation entre la gestion d'une ressource se régénérant sur plusieurs décennies et devant nécessairement être durable avec les besoins d'une industrie subissant des évolutions sectorielles rapides. La réglementation ainsi que les labels PEFC et FCS sont garants de cette gestion durable mais restent soumis à des pratiques de gestion ou commerciales opaques.

Nous avons vu, en Partie II, que la structuration de la filière des F-LDB était favorable à son développement industriel à venir mais qu'elle pouvait conduire à des problématiques en terme de durabilité socioéconomique. La gestion de la ressource forestière par la filière connaît le problème inverse : elle s'inscrit dans une démarche durable, car exploitant en grande partie un sous-produit issu d'une énergie renouvelable, qu'il s'agisse de BIBE ou de PCS. Cependant, il paraît peu envisageable de développer significativement cette activité, ou toute autre activité exploitant ce type de ressource, sans s'extraire de cette logique durable.

3.2.1.1 L'Analyse du cycle ACV :

L'ACV (Analyse du Cycle de Vie) est une procédure normalisée par la NF EN 15804+A1 et la NF EN 15804/CN à l'échelle nationale. Cet outil scientifique a pour principal objet la mesure de l'évaluation environnementale et sanitaire des matériaux d'un bâtiment ou même d'un quartier tout au long de sa durée de vie. Les informations relatives à l'ACV de chaque matériau de cette partie sont présentées dans les FDES et DEP établies par chaque fabricant pour un produit spécifique ou sur la moyenne de l'ensemble d'une gamme de produits similaires. Comme nous l'avons vu, la rédaction de ces FDES et DEP ainsi que leur vérification par une tierce personne indépendante et agréée, par un organisme certifié par le CSTB, sont obligatoires. L'ensemble des DEP et FDES utilisées pour cette analyse seront disponibles en annexe 7 à 11. Bien que ces informations émanant des fabricants et sont donc susceptibles de produire et d'interpréter les données à leur avantage, ces documents forment l'une des bases de données les plus complètes, intégrant et détaillant l'ensemble des phases du cycle de vie des matériaux qu'elles traitent.

Ces fiches ont normalement pour vocation de faciliter la comparaison des impacts environnementaux des produits au niveau de la consommation énergétique nécessaire en distinguant la part des énergies renouvelables, des émissions de gaz à effet de serre et du volume de déchets produits pour un m³ de matière tout au long du cycle de vie. L'objectif de cette sous-partie n'est pas d'établir une analyse comparative permettant de déterminer le bilan énergétique de chaque fabricant mais bien une interprétation croisée des données afin d'en extraire les dynamiques principales permettant une analyse de ces caractéristiques environnementales à l'échelle de la filière.

3.2.1.2 Définitions, d'après l'ouvrage (Samuel COURGAY, Jean-Pierre OLIVA, 2010) :²⁴

- Energie primaire : l'énergie finale + énergie nécessaire à la production, c'est à dire le nombre de kWh consommés x un coefficient énergétique estimé nécessaire à la production de cette énergie : par exemple 1 kWh d'énergie électrique final vaut 2,58 kWh d'énergie primaire.
- Energie de procédé : Il s'agit de la quantité d'énergie primaire nécessaire aux différentes phases, par exemple la fabrication ou l'élimination d'une certaine quantité de matière. Elle peut distinguer ou cumuler les parts des énergies primaires renouvelables et non renouvelables

²⁴ S. COURGEY, J-P OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. –Terre vivante, Mens, 2010 – p. 86

- Energie grise : Il s'agit de la somme des énergies primaires de chacune des phases du cycle de vie pour un matériau et une UF déterminée. Elle peut distinguer ou cumuler les énergies primaires de procédé et intégrées.
- Unité fonctionnelle (UF) : Il s'agit de l'étalon de mesure caractérisant la quantité de matière permettant d'établir des analyses comparatives, par exemple au niveau de l'énergie grise et du bilan CO₂. L'UF est variable selon la nature des matériaux comparés (m², m³, tonnes...) Au niveau des matériaux isolants, l'unité étalon la plus pertinente est celle de la quantité de matériau nécessaire pour atteindre une même résistance thermique, par exemple R = 5 m².K/W. En effet, cette UF prend en compte la performance thermique des matériaux contrairement à un étalon masse ou volume.

3.2.1.3 Les différentes phases du cycle ACV :

Stade de la production			Stade de la construction du bâtiment		Stade de l'utilisation							Stade de l'élimination				Avoirs et charges en-dehors des limites du système
Alimentation en matières premières	Transport	Fabrication	Transport du fabricant au lieu d'utilisation	Montage	Utilisation / application	Maintenance	Réparation	Remplacement	Renouvellement	Energie utilisée pour exploiter le bâtiment	Eau utilisée pour exploiter le bâtiment	Démontage / Démolition	Transport	Traitement des déchets	réparation	Potential de réutilisation, de récupération et de recyclage
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Tableau 6 : Description des phases du cycle ACV

La description commune des phases décrites dans l'ensemble des FDES et DEP jointes en annexes 7 à 11, s'établit comme suit :

- Les phases de production (A) comprenant le bilan environnemental des prélèvements en matière première (A1), du transport de cette matière jusqu'au site de production des panneaux (A2) et le bilan environnemental de la fabrication des panneaux à proprement parler comprenant les données liées aux éléments de stockage et d'emballage (A3).
- Une phase de transport (A4) du site de production jusqu'au site de distribution puis jusqu'au chantier. La phase nécessaire au chantier (A5) comprend, outre le bilan environnemental de la mise en œuvre, celui nécessaire à une production de panneaux supplémentaire destinée à compenser le taux de chute de chantier.
- Les phases B1 à B7 prennent en compte les aspects énergétiques liés à la vie utile du matériau, l'ensemble des FDES et DEP estimant que la durée de vie utile du matériau est de 50 ans ou bien assimilable à la durée de vie du bâtiment.
- Les phases C1, C2, C3, C4 traitent du bilan énergétique nécessaire au traitement en fin de vie du matériau et la phase D, d'une revalorisation énergétique potentielle du matériau mais présentant des caractéristiques variables selon les scénarios envisagés par les fabricants, la phase D fera l'objet d'une analyse spécifique.

3.2.1.4 Limites méthodologiques de l'interprétation des données :

Premièrement, la comparaison des données s'avère problématique en raison des différences méthodologiques opérées dans chaque FDES et DEP. Par exemple STEICO établit une seule DEP dont les valeurs sont obtenues par la moyenne pondérée de l'ensemble des produits fabriqués mais ne permet pas de distinguer les différences de valeurs par type de matériau. A l'inverse, la DEP de PAVATEX nous propose des données pour chaque type de produits mais en présentant les résultats de manière synthétique, sous forme de valeurs uniques « production/élimination ». De plus, la DEP de PAVATEX est réalisée selon une normalisation propre à la suisse et pour des sites de production situés dans ce pays. Dans tous les cas, les données synthétiques de PAVATEX ne pourront être utilisées qu'à des fins de comparaison des résultats mais pas dans le détail du calcul. Seul ISONAT a produit des FDES permettant une analyse des aspects environnementaux pour un grand nombre d'étapes et pour des produits différenciés.

Ensuite, l'unité fonctionnelle attribuée par chaque fabricant diffère dans chaque document. STEICO prend comme unité fonctionnelle le m^3 sur une moyenne de plusieurs produits empêchant donc toute conversion pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2.k/W$, unité pourtant plus juste que le m^3 dans l'analyse de l'ACV d'un produit isolant. ISONAT est le seul fabricant utilisant une UF « produit/ m^2 » que l'on peut convertir en UF de $R = 5 \text{ m}^2.k/W$ dans ses FDES. Ces contraintes méthodologiques et paramétriques rendent impossible la formulation de valeurs moyennes aux trois fabricants, en distinguant chaque phase et chaque produit, initialement envisagée. A défaut, nous comparerons dans un premier temps les données de 3 produits ISONAT représentatifs : le *Flex 40* (LDB souple), le *Multisol 140* (Panneau intermédiaire) et le *Duoprotect* (Panneau rigide). La conversion de l'UF « Produit » pour une UF $R=5 \text{ m}^2.k/W$, plus adéquate, nécessite un coefficient multiplicateur différent pour chaque produit, des valeurs présentées dans les FDES:

- Flex 40 :
Ep = 200 mm pour $R = 5,25 \text{ m}^2.k/W$ donc 190 mm pour $R = 5 \text{ m}^2.k/W$, soit un coefficient multiplicateur des données de 0,95.²⁵
- Multisol 140 :
Ep = 60 mm pour $R = 1,4 \text{ m}^2.k/W$ donc 214 mm pour $R = 5 \text{ m}^2.k/W$ soit un coefficient multiplicateur des données de 3,57.²⁶
- Duoprotect :
Ep = 120 mm pour $R = 2,6 \text{ m}^2.k/W$ donc 230 mm pour $R = 5 \text{ m}^2.k/W$ soit un coefficient multiplicateur des données de 1,92.²⁷

²⁵ Annexe 7 : FDES du produit Flex 40 – ISONAT, Malby, 2016 – p. 5 à 13

²⁶ Annexe 8 : FDES du produit Multisol 140 – ISONAT, Malby, 2016 – p 5 à 13

²⁷ Annexe 9 : FDES du produit Duoprotect – ISONAT, Malby, 2016 – p 5 à 13

3.2.2 ANALYSE DE L'ÉNERGIE GRISE LIÉE AU MATÉRIAU :

Dans un premier temps, nous examinerons donc les résultats du cycle ACV à travers les critères de la consommation des énergies de procédé, du coefficient global de réchauffement ou bilan CO₂ et des pollutions aériennes et aquatiques des produits ISONAT.

3.2.2.1 Analyse de l'énergie primaire de procédé :

Les FDES de ISONAT cumulent les valeurs des phases de production A1,A2 et A3 sous une valeur unique. Les phases de mise en service A4 et A5 et de fin de vie C2, et C4, sont également prises en compte par le fabricant. les phases B1 à B7 liées à la vie utile du matériau n'étant pas consommatrices d'énergie ou productrices de polluants, aucune valeur n'est renseignée dans les FDES.^{25, 26 et 27} Après conversion, via la multiplication des valeurs des FDES, on obtient :

Energie primaire cumulée [MJ/R=5]	A1 + A2 + A3	A4	A5	C2	C4	TOTAL
Flex 40	180,00	16,50	18,81	1,00	0,05	216,36
Multisol 140	660,50	25,00	132,10	2,00	5,70	825,30
Duoprotect	906,00	28,80	178,56	1,92	7,90	1 123,18

Tableau 7 : Cumul des énergies primaires des produits ISONAT pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{k/W}$

On constate dans un premier temps que le cumul des phases A1/A2/A3 représente, quelque soit le matériau, entre 80% et 83% de l'énergie consommée durant le cycle, l'écart étant principalement dû au processus sec ou humide de production. La phase A4 de transport et de distribution jusqu'au chantier, sur une distance de 360 km, jouant un rôle minoritaire, compris entre 2,5% et 7,6% de l'énergie primaire consommée. Les phases de mise en service sur chantier représentent une part de consommation énergétique considérable, allant de 9% à 15.8% de l'ensemble du cycle. Les phases C2 et C4 liées à la fin de vie restent énergétiquement très minoritaires, avec des valeurs inférieures à 1% de l'énergie primaire totale.

Outre la grande prédominance de la consommation liée aux étapes de production, on constate qu'il existe de grandes disparités entre les produits : la LDB *Flex 40* ayant une énergie grise de procédé, sur les phases prises en compte, 5 fois moins élevée que la FDB *Duoprotect*.

STEICO est le seul fabricant à distinguer, dans sa DEP, les données dans les phases A1, A2 et A3.²⁸ La phase A3 liée à la fabrication des panneaux même reste de loin la plus énergivore, avec 2700 MJ/m³ (soit 95,5% des trois phases) contre 122 MJ/m³ liés à la phase A1 de coupe et de première transformation (soit 4,3%) et 5,2 MJ (seulement 0,02%) liés au transport jusqu'au site de production. Ainsi la phase procédé de fabrication A3 reste la phase prépondérante au niveau de l'énergie grise de procédé.

²⁸ Annexe 11 : DEP Isolants en fibres de bois – STEICO SA, Institut Bauen und Umwelt, Berlin, 2016 – p. 7 et 8

3.2.2.2 Analyse des teneurs en énergies primaires :

Les FDES d'ISONAT nous renseignent sur la quantité des énergie renouvelables utilisées pour chaque phase du cycle de vie :

Energie primaire renouv. [MJ/R=5]	A1 + A2 + A3	A4	A5	C2	C4	TOTAL
Flex 40	44,60	0,00	10,45	0,01	0,02	55,08
Multisol 140	160,00	0,00	74,97	0,00	0,10	235,07
Duoprotect	218,90	0,02	103,00	0,00	0,14	322,06

Tableau 8 : Cumul des énergies primaires renouvelables des produits ISONAT pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2.k/W$

Leur part par rapport à l'énergie primaire totale peut être convertie sous forme de pourcentages dans le tableau suivant :

Energie primaire renouv. en % du total	A1 + A2 + A3	A4	A5	C2	C4	TOTAL
Flex 40	25%	0%	56%	0%	2%	25%
Multisol 140	24%	0%	57%	0%	2%	28%
Duoprotect	24%	0%	58%	0%	2%	29%

Tableau 9 : Pourcentage d'intégration des énergies primaires renouvelables des produits ISONAT pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2.k/W$

On constate qu'une part significative de 25% d'énergies renouvelables, est employée en tant qu'énergie primaire dans le procédé de fabrication. De plus, leur part est équivalente pour la production de chaque produit. Ces énergies proviennent principalement de bois comme combustible pour la production de chaleur de processus. L'emploi d'énergies renouvelables est donc à relativiser étant donné les fortes émissions de CO_2 liées à cette énergie. Les principales énergies non renouvelables utilisées chez STEICO sont celles issues du gaz naturel, environ 60%, et du pétrole brut à hauteur de 30%.²⁸

3,2,3 ANALYSE DES AUTRES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

3.2.3.1 Le coefficient GWP :

Outre les énergies primaires consommées, les fiches FDES répertorient 7 paramètres d'impacts environnementaux. Nous nous concentrerons sur les paramètres les plus significatifs qui sont le Potentiel Global de réchauffement GWP, et la pollution de l'air et de l'eau. Le GWP prend comme unité le kg/eq CO₂. Il s'agit de la somme des contributions au réchauffement climatique, de chaque gaz, équivalent à 1 kg de CO₂ = 1. Les valeurs des FDES d'ISONAT pour les trois produits types sont reprises dans le tableau ci-dessous : ^{25, 26 et 27}

Coeff GWP [kg éq. CO ₂] pour R=5	A1+A2+A3	A4	A5	C2	C4	TOTAL
Flex 40	7,4	1,3	0,5	0,1	0,1	9,4
Multisol 140	23,2	2,0	2,7	0,1	4,0	32,1
Duoprotect	32,6	2,3	3,6	0,2	0,6	39,3

Tableau 10 : Cumul du potentiel global de réchauffement des produits ISONAT pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2.k/W$

On constate que la part de chacune des phases est directement corrélée à la consommation d'énergie primaire intégrée, dans des proportions similaires. Les postes liés à la production sont donc responsables de près de 80% des émissions en CO₂ liées aux produits. On peut également observer une importante différence dans les procédés. Le procédé humide du *Duoprotect* a une valeur GWP 4.5 fois supérieure à celle du *Flex 40*, présentant donc, là encore, un écart comparable avec les quantités d'énergies primaires émises pour chaque produit.

3.2.3.2 La pollution de l'air et de l'eau :

Ces deux types de pollution sont calculés en nombre de m³ pollués par UF : ^{25, 26 et 27}

Pollution de l'air [m ³] pour R=5	A1 + A2 + A3	A4	A5	C2	C4	TOTAL
Flex 40	1 139,0	82,7	67,5	5,3	43,7	1 338,1
Multisol 140	2 049,2	128,5	246,3	9,0	170,4	2 603,4
Duoprotect	2 803,0	144,0	332,2	9,8	240,0	3 529,0

Tableau 11 : Cumul de la pollution de l'air des produits ISOANAT pour une UF de $R = \text{m}^2.k/W$

Là encore, on constate que les phases de fabrication sont responsables de près de 90% de la pollution de l'air et que les écarts entre les produits restent sensiblement les mêmes que ceux observés dans les consommations d'énergie primaire et dans le bilan CO₂.

Pollution de l'eau [m ³] pour R=5	A1 + A2 + A3	A4	A5	C2	C4	TOTAL
Flex 40	1,1	0,4	1,0	5,3	43,7	51,5
Multisol 140	2,9	0,6	7,1	0,0	67,8	78,5
Duoprotect	3,8	0,6	0,1	0,0	94,0	98,6

Tableau 12 : Cumul de la pollution de l'eau des produits ISOANAT pour une UF de $R = \text{m}^2.k/W$

En revanche, ce sont les phases de destruction qui sont majoritairement polluantes pour l'eau, les phases de fabrication étant en moyenne deux fois moins impactantes que la phase de chantier pour ce critère. Les produits issus du procédé humide sont donc globalement 4 à 5 fois plus énergivores et plus impactants sur l'environnement que les laines souples.

3.2.4.1 L'influence de l'énergie intégrée au matériau dans le cycle ACV :

Les données précédentes permettent de se faire une idée de l'énergie grise de procédé et des impacts environnementaux liés au procédé sans prendre en compte l'énergie intégrée aux produits. Lorsqu'elle est prise en considération, cette énergie peut représenter jusqu'à 66% de l'énergie totale liée à la fabrication.²⁸ Or sa prise en compte dans le calcul de l'ACV connaît deux limites méthodologiques :

- Premièrement, cette énergie est, en grande partie lorsqu'elle est d'origine renouvelable, accumulée dans le matériau bois par le procédé photochimique naturel et inépuisable de la photosynthèse. Elle est donc étrangère à toute intervention ou consommation énergétique humaine susceptible d'impacter le cycle ACV. Il paraît donc méthodologiquement inadéquat de cumuler avec la même pondération une énergie de procédé ayant un impact environnemental avéré, même si elle est issue de source renouvelable, avec une énergie produite par des mécanismes naturels comme le font les FDES.
- Le matériau n'étant commercialisé massivement que depuis 20 ans en France, et possédant une durée de vie moyenne estimée à 50 ans, les aspects énergétiques liés à sa fin de vie ne sont donc pas basés sur des données représentatives mais sur des scénarios hypothétiques élaborés par les fabricants. D'importantes divergences existent dans ces scénarios, en raison des 4 hypothèses possibles pour caractériser la fin de vie du matériau : le réemploi, la revalorisation énergétique, l'enfouissement/stockage ou bien le compostage.

La DEP de STEICO estime que 100% des matériaux sont revalorisés énergétiquement en tant que combustibles.²⁸ Au contraire, ISONAT prévoit un scénario de stockage ou d'enfouissement pour la totalité de ses produits dans ses FDES.^{25, 26 et 27} Or, un scénario privilégiant la revalorisation énergétique, où le matériau est utilisé comme combustible pour la production d'électricité ou de chaleur, bénéficiera d'un effet compensatoire. En effet, la déduction de la nouvelle énergie produite sur l'énergie de procédé influencera positivement les résultats du cycle par rapport à un scénario privilégiant le stockage ou l'enfouissement. A l'inverse, le CO₂ naturellement contenu dans les fibres de bois est intégralement libéré lors de cette même combustion, engendrant un bilan CO₂ neutre contrairement à un scénario d'enfouissement/stockage où le CO₂ restera accumulé dans le bois. Les divergences dans les scénarios envisagés joueront donc sur les leviers d'une compensation énergétique inversement proportionnelle à la valeur du bilan CO₂. Nous pouvons également observer que les taux estimés de rendement liés à une combustion pour la revalorisation dans une centrale biomasse divergent entre les DEP de STEICO et de PAVATEX.²⁹ Dans tous les cas, ces scénarios et les effets compensatoires qui y sont liés n'affectent que le bilan des énergies intégrées et ne modifient donc en rien les valeurs de la sous-partie précédente.

Néanmoins, les LDB les moins denses et certaines FDB pare-pluie ont des teneurs en additifs synthétiques importants, elles ne peuvent donc, ni être enfouies, ni servir de compost mais peuvent seulement connaître une fin de vie sous forme de revalorisation énergétique ou de réutilisation sur chantier. D'autres effets compensatoires, comme la prise en compte ou non des économies d'énergie réalisées grâce au pouvoir isolant du matériau sont susceptibles d'influencer les résultats mais ne sont pas pris en compte dans les FDES et DEP analysées.

Même si les scénarios diffèrent, Les F-LDB possèdent un potentiel valorisant et diversifié en fin de vie. Le matériau peut être ré-employable sur un autre chantier mais, également être enfoui, et donc conserver sa fonction de « puits à CO² », servir de compost ou bien être revalorisé en tant que combustible, qu'il soit réintégré dans le processus de production de panneaux similaires ou non. Le matériau possède donc un bon caractère recyclable, non comme matière première mais comme source d'énergie. Chaque FDES et DEP précisant également que les matériaux issus du processus humide ne contiennent que très peu d'additifs, non nocifs et donc considérés comme étant biodégradables.

3.2.4.2 Variation du Bilan de l'énergie grise de procédé selon les scénarios de fin de vie :

Dans la DEP de STEICO, les phases de production A1,A2,A3 génèrent plus de 95% de l'énergie liée à la matière première. Celle-ci se compose d'énergie renouvelable intégrée, c'est-à-dire principalement les fibres contenues dans l'isolant qui représentent, tout produit confondu, 2525 MJ/m³ et des énergies non renouvelables intégrées, c'est à dire principalement les additifs présents dans les produits pour une valeur de 1642 MJ/m³, soit 39% de l'énergie primaire totale intégrée. La quantité d'énergie compensatoire, retirée suite à la valorisation par combustion, est variable selon la revalorisation envisagée : elle s'élève, selon le fabricant, en moyenne à 35% de l'énergie intégrée pour la production de chaleur de processus et à 23% pour un rendement électrique.²⁸

Certaines centrales biomasses plus récentes à cogénération, produisant donc électricité et chaleur de processus simultanément, affichent cependant des rendements totaux supérieurs à 50%.³⁰ Notons cependant que le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) du bois, c'est à dire la quantité d'énergie effectivement revalorisée par rapport à l'énergie initialement contenue dans une unité de matière, est largement inférieure à celle d'autres énergies fossiles.

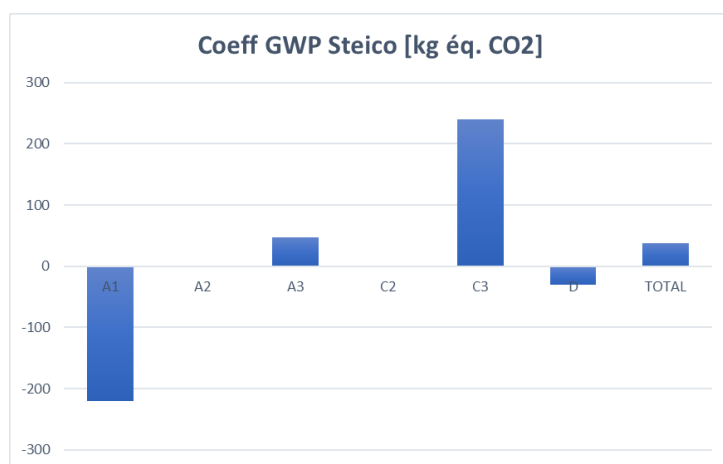
En conclusion, la prise en compte de l'énergie intégrée dans le cas d'une revalorisation par combustion pour la production d'énergie de chaleur avec un rendement de 35% apporterait une compensation de 1410 MJ/m³ sur l'ensemble des produits STEICO. Cela correspondrait à un effet compensatoire significatif de 39% de l'énergie totale de procédé, la faisant ainsi basculer de 3593 MJ/m³ à 2183 MJ/m³.²⁸ ISONAT préconisant l'enfouissement ou le stockage pour la fin de vie de ces produits, les FDES ne présentent aucun effet compensatoire pour l'ensemble de ceux-ci.^{25, 26 et 27}

²⁹ Annexe 10 : DEP Panneaux isolants en fibres de bois – PAVATEX SA, Institut Bauen und Umwelt, Fribourg, 2010 – p. 10

³⁰ Site internet – Association Aalborg Energie Technique – Disponible sur : <https://aet-biomass.fr/fr-FR/Accueil/Produits-AET/Installations-de-cogénération-à-biomasse.aspx>

3.2.4.3 Variation du bilan CO₂ selon les scénarios de fin de vie :

Au cours de sa croissance, l'arbre accumule du CO₂ se retrouvant intégré dans le matériau isolant, cette teneur en CO₂ est jugée équivalente tout au long de sa durée de vie. STEICO évalue la quantité de CO₂ liée au matériau à 239 kg/m³.²⁸ La combustion liée à une revalorisation énergétique libère intégralement ce CO₂ engendrant un bilan quasiment « neutre », contrairement à une solution de stockage, d'enfouissement ou de réemploi générant un bilan CO₂ « négatif », ce dernier restant intégré à la matière.



Graphique 17 : Cumul du Potentiel global réchauffement des énergies de procédé et intégrées pour une UF de 1m³

Une mise en forme sous graphique des résultats du coefficient GWP sur l'ensemble de la durée de vie des produits STEICO intégrant le CO₂ lié au produit démontre que, si le matériau est intégralement revalorisé comme énergie, le CO₂ accumulé dans le bois durant la phase A1 est réémis dans des proportions équivalentes en phase C3 de traitement des déchets.²⁸ Les FDES de ISONAT ne tiennent pas rigueur du potentiel d'accumulation de CO₂ intégré au matériau, mais seulement des émissions en CO₂ émises durant son cycle de vie.^{25, 26 et 27} Ainsi elles ne prennent pas en compte la plus value énergétique réalisée grâce à l'accumulation et au maintien de CO₂ dans la matière pour le scénario de stockage/enfouissement qu'elles ont élaboré.

Or, selon les données du graphique 17, la quantité de CO₂ conservée dans le bois des produits est 5 fois supérieure aux émissions nécessaires à la fabrication et au transport d'un m³ de matière. Si l'on considère équivalente la teneur en CO₂ des produit STEICO à celle des produits *Flex 40*, *Multisol 140* et *Duoprotect* d'ISONAT STEICO, alors la moyenne du coefficient GWP pour ces 3 produits serait approximativement de -110 kg éq CO₂ et non de 130 kg éq CO₂ comme l'indique la moyenne des FDES pour une UF de 1 m³ avec le scénario qu'elles prévoient.

On constate, par ailleurs, que dans le graphique 17, l'accumulation et la libération de CO₂ à l'intérieur du bois (phases A1 et C3) est 5 fois supérieure aux émissions nécessaires à la fabrication de la phase A3. Ainsi, la prise en compte ou l'omission du CO₂ lié aux matériaux ainsi que le scénario de fin de vie envisagé sont les deux paramètres expliquant la grande variabilité des résultats du Bilan CO₂ observable aussi bien dans les FDES et DEP que dans les autres documents comparatifs.

3.2.4.3 Différentiel dans la prise en compte des énergies non renouvelables intégrées :

Après avoir établi que la consommation énergétique pour une résistance énergétique équivalente à $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ d'un processus humide est 6,5 fois plus énergivore que celle d'un processus sec. Il apparaît alors intéressant de connaître la part des énergies non renouvelables intégrées, autrement dit celle correspondant aux liants et autres additifs pour ces deux procédés.

Si l'on compare la somme des énergies non renouvelables intégrées, avec l'UF « produits » utilisée dans les FDES *Flex 40* et *Duoprotect*, on obtient 15 MJ/panneau pour le produit *Flex 40* contre 9.2 MJ/panneau pour le produit *Duoprotect* et donc respectivement 14.25 MJ et 17,66 MJ si l'on prend une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{k}/\text{W}$.^{25 et 27}

Ainsi, les teneurs plus élevées en liant des LDB analysées en Partie I (4% à 15% de la masse des produits) ne sont pas révélatrices des teneurs en énergie non renouvelables intégrées pour une résistance thermique équivalente des produits.

On constate en premier lieu qu'il existe de grandes corrélations entre les quantités d'énergies consommées, les émissions de CO₂ et la pollution de l'air pour chacune des phases du cycle de vie : l'énergie nécessaire à la fabrication étant de loin le poste le plus impactant avec près de 80% de la consommation d'énergie primaire de procédé. Vient ensuite la phase de chantier avec près de 9% à 15% des énergies puis le transport qui reste très minoritaire, compris entre 2,5% et 7% des consommations en énergie primaire pour une distance de 360 km. Les autres phases de la durée de vie ont des valeurs généralement inférieures à 1%.

Ces données restent cependant à nuancer en raison de la forte influence de l'UF choisie. En effet, si l'on s'en tient à l'UF « produit » utilisé dans les FDES d' ISONAT, l'énergie primaire de procédé nécessaire pour la production des panneaux : *Flex 40*, *Multisol 140* et *Duoprotect*, les écarts observés se resserrent avec respectivement des valeurs de 189 MJ, 185 MJ et 472 MJ7. Rappelons que l'UF R = 5 m².k/W comporte certaines limites, en ne prenant pas en compte les spécificités techniques des produits ou la réalité constructive comme nous le verrons en partie 3.3.

La part des énergies renouvelables, comparable entre chaque fabricant quelque soit l'UF, durant le processus de fabrication, est variable selon les fabricants et les produits: entre 25% (ISONAT) et 45% (STEICO). Ces pourcentages restent 1,5 à 2 fois plus élevés que la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique français, évalué par le ministère l'environnement en 2017 à 18% de l'énergie totale. Ils témoignent donc des efforts consentis par les industriels pour leur contribution à la transition énergétique. Comme le confirment les entretiens et la partie liée à la R&D , l'augmentation de la part des énergies renouvelables est un levier d'action important pour les industriels afin de compenser les aspects plus incompressibles liés à la forte consommation énergétique du processus de production.

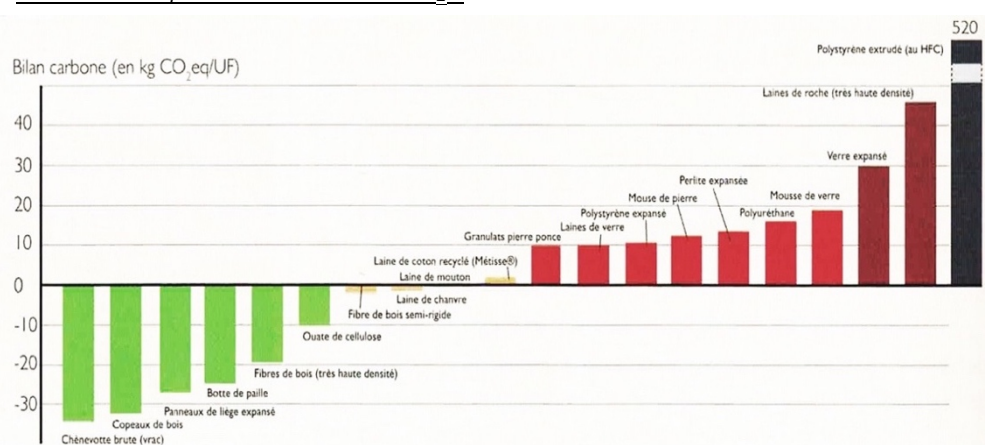
Le manque de recul historique ainsi que la divergence des scénarios proposés et de leur mode de pondération dans chaque FDES et DEP ne permettent pas d'établir un bilan significativement représentatif de l'énergie intégrée au matériau en fin de vie. Par sa composition, le matériau offre cependant un potentiel de recyclage et de réemploi intéressant : utilisation en tant que compost, revalorisation énergétique comme combustible ainsi qu'un réemploi possible sur un autre chantier. L'effet compensatoire obtenu dans le cadre d'une revalorisation énergétique peut être important, mais reste très variable selon le type d'énergie produite. Le bilan CO₂ est également fortement influencé par la fin de vie du matériau. Il est neutre dans le cas d'une combustion et proportionnellement négatif à la densité des panneaux dans le cas d'un stockage ou d'un enfouissement. Dans le cas d'un stockage, la quantité de CO₂ préservée dans le bois des F-LDB est 5 fois supérieure à celle émise durant le procédé de fabrication, ce qui offre un effet compensatoire très valorisant.

3,3 ANALYSE COMPARATIVE AVEC D'AUTRES MATÉRIAUX

3,3,1 COMPARAISON DES BILANS AVEC LA BASE BAUBOOK:

De nombreuses sources présentent des bilans comparatifs en termes d'énergie grise ou de bilan CO₂ des produits isolants. En raison des variantes méthodologiques, de l'UF et des paramètres pris en compte, les résultats qu'elles présentent sont souvent complexes à comparer. Ainsi l'analyse comparative initialement envisagée avec les FDES de différents matériaux ne s'avère pas envisageable en raison de la variation d'un trop grand nombre de paramètres. Plusieurs bases restent néanmoins représentatives, les données des graphiques ci-dessous « bilan Co₂ » et « comparatif énergie grise » sont issus de l'organisme certificateur *Baubook*, l'équivalent autrichien du CSTB. Ces outils possèdent l'une des bases de données les plus complètes s'appuyant sur la référence internationale des Ecoinvents.³¹

3.3.1.1 Comparaison du bilan CO₂ :



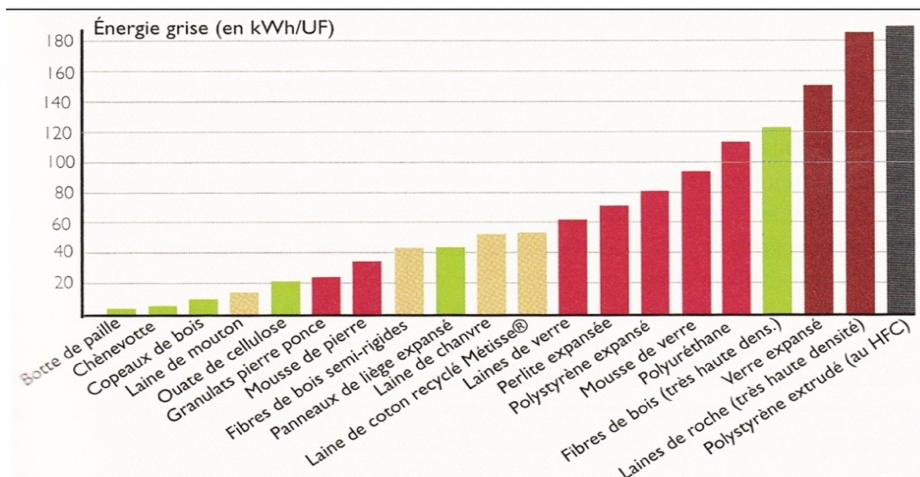
Graphique 18 : Bilan CO₂ des matériaux isolants en excluant le cas d'une revalorisation énergétique selon le Baubook

Ce bilan CO₂ tient compte de l'énergie intégrée au matériau dans le cumul des phases de production A1, A2 et A3. Les matériaux végétaux pouvant contenir du CO₂ intégré à leur matière ont donc tous un bilan neutre ou négatif correspondant à leur capacité de stockage égale ou supérieure au CO₂ nécessaire à leur production. A ce titre, les matériaux les plus denses et faiblement transformés, ne recourant généralement pas aux liants polymères, ont le bilan le plus favorable. Cependant, on observe que les matériaux ayant le bilan le plus valorisant ne sont pas systématiquement les plus denses : la chènevotte a une masse volumique p variant de 90 à 110 kg/m³, soit celle d'une FDB de faible densité mais possède un bilan CO₂ plus valorisant.

³¹ S. COURGEY, J-P OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre* – Terre vivante, Mens, 2010 – p. 88 à 92

3.3.1.2 Comparaison de l'énergie grise :

Ce bilan d'énergie grise proposé par le *Baubook* ne prend pas en compte l'énergie intégrée à la matière mais uniquement l'énergie renouvelable et non renouvelable nécessaire à la fabrication des matériaux avec une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ayant la même durée de vie type de 50 ans que celle présentée dans les différentes FDES.³¹



Graphique 19 : Bilan de l'énergie grise ne prenant en compte seulement les énergies primaires non renouvelables de la phase de fabrication selon le *Baubook*

Dans un premier temps, on constate une corrélation majeure entre le bilan *énergie grise* et CO_2 : les isolants comportant un bilan CO_2 négatif (en vert) sont aussi les moins énergivores, à l'exception des FDB, ceux ayant le bilan CO_2 le plus défavorable étant les plus énergivores. On observe également que l'énergie grise des LDB est comparable à celle des autres isolants d'origine végétale comme les laines de chanvre ou de coton, mais aussi de la ouate de cellulose. Le conditionnement en panneaux de la ouate pour un usage comparable aux panneaux LDB étant jusqu'à 3 fois plus énergivore que le conditionnement en vrac présenté par le *Baubook*.³¹

Les bottes de paille et la chènevotte ne nécessitant que très peu de conditionnement industriel, ces solutions restent de loin les moins énergivores. En revanche, l'énergie grise des FDB, comparable à celle du polyuréthane, est 2 à 3 fois supérieure à celle des autres isolants biosourcés et minéraux couramment utilisés et se retrouve donc parmi les solutions les plus impactantes. Il faut cependant souligner que le conditionnement en panneaux peut engendrer des valeurs jusqu'à 3 fois supérieures par rapport à un conditionnement en vrac pour la ouate de cellulose en raison du procédé industriel et des additifs utilisés. En d'autres termes les produits subissant le moins de transformation et d'origine végétale restent de loin les solutions les moins impactantes aussi bien au niveau de l'énergie grise que dans le bilan CO_2 .

Cette base de données présente néanmoins une limite importante : elle ne prend en considération que l'énergie de procédé non renouvelable liée à la phase de production des matériaux. Ainsi l'énergie nécessaire à l'élimination ou bien celle pouvant générer un effet compensatoire dans un scénario de revalorisation ne sont pas prises en compte. Or les isolants biosourcés végétaux sont ceux ayant le potentiel de revalorisation le plus élevé, quand les isolants synthétiques requièrent les quantités d'énergie les plus impactantes pour leur élimination.

3.3.1.3 Comparaison de l'énergie grise du Baubook avec les données Isonat :

Le Bilan CO₂ proposé dans la base *Baubook* n'est pas comparable à FDES étant donné les trop fortes variables paramétriques. Cependant, les paramètres de l'étude étant les mêmes dans les deux bases de données, au niveau de l'énergie grise de procédé, il est possible de vérifier la concordance des produits ISONAT avec les données de la base *Baubook* pour le cumul des énergies de procédés non renouvelables. Il suffit pour cela de convertir l'UF « produit » des FDES ISONAT en une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ de la base *Baubook* avec les mêmes coefficients multiplicateurs que ceux dans la partie 3.2.1.4, puis de convertir les Mégajoules des FDES en Kilowattheures de la base *Baubook* ($1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$).^{25, 26 et 27}

Conversion des données du Flex 40 :

- Cumul des énergies non renouvelables de la phase « production » : 142 MJ
- $R \text{ « panneau »} = 5,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- $142 \times 0,95 = 135 \text{ MJ}$ pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- $135 \text{ MJ} / 3,6 = \underline{37,5 \text{ kWh}}$ pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Cette valeur est donc 10% moins élevée que celle renseignée dans l'écobilan *Baubook* pour les LDB souples.

Conversion du Multisol 140 :

- Cumul des énergies non renouvelables de la phase « production » : 140 MJ
- $R \text{ « panneau »} = 1,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- $140 \times 3,57 = 500 \text{ MJ}$ pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- $500 \text{ MJ} / 3,6 = \underline{139 \text{ kWh}}$ pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Cette valeur est 10% plus élevée que celle présentée dans le *Baubook* pour les FDB rigides alors qu'il ne s'agit que d'un produit intermédiaire.

Conversion du Duoprotect 35 :

- Cumul des énergies non renouvelables de la phase « production » : 358 MJ
- $R \text{ « panneau »} = 2,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- $358 \times 1,92 = 687 \text{ MJ}$ pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- $687 \text{ MJ} / 3,6 = \underline{190 \text{ kWh}}$ pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Cette valeur est 35% plus élevée que la valeur des FDB du *Baubook*.

Mises à part les données concernant le produit Duoprotect, on constate que les valeurs émises par les fabricants dans les FDES ne connaissent pas des écarts supérieurs à 10% avec les valeurs émises par la base *Baubook*. Même s'il reste possible qu'il y ait une différence paramétrique dans le calcul des valeurs de chaque base de données, les données des fabricants restent représentatives par rapport à celles établies par un organisme scientifique indépendant.

3.3.1.4 Informations sur les autres critères :

Le bilan CO₂ et l'énergie grise peuvent être considérés comme des paramètres d'évaluation environnementale prépondérants. Il reste néanmoins important que les performances relatives à ces deux critères ne soient pas lourdement compensées par les données liées à un ou plusieurs paramètres « secondaires ».

L'ouvrage de Samuel COURGAY Et Jean-Pierre OLIVA (2010) précise, sans toutefois s'appuyer sur des données chiffrées, que la corrélation observée entre le Bilan CO₂ et le bilan énergie grise des matériaux est aussi valable pour les critères de toxicité, d'épuisement des ressources naturelles et de la gestion de fin de vie pour l'ensemble des matériaux.³¹ En d'autres termes, les bonnes et mauvaises performances énergétiques des isolants se confirment sur l'ensemble des critères environnementaux. En effet, les isolants synthétiques sont issus de ressources fossiles, pouvant être géographiquement éloignées, se raréfiant et subissant généralement un lourd processus de plusieurs transformations compromettant leur recyclabilité.

Les isolants minéraux, même si leur impact sanitaire peut s'avérer problématique, présentent l'avantage d'être issus de ressources fossiles généralement non épuisables ou bien d'intégrer un pourcentage de produits recyclés, comme la laine de verre.³¹

Par définition, les F-LDB, comme l'ensemble des matériaux biosourcés, sont issues d'une ressource renouvelable, ne présentent généralement pas de problème de toxicité aussi bien en phase de chantier qu'en phase utile et présentent un potentiel de revalorisation varié et intéressant malgré un processus de fabrication lourd. Là encore les produits les moins transformés, comme la paille ou la chènevotte en vrac, présentent les caractéristiques de toxicité les moins importantes.

Cependant, certains produits issus du recyclage, comme les isolants textiles, peuvent présenter un certain caractère de toxicité en fin de vie. De plus, les lourdes transformations industrielles opérées pour la production de panneaux FDB ou de liège expansé ne les inscrivent pas forcément dans une démarche de développement durable. Ainsi, même si les termes « durables » et « renouvelables » s'inscrivent souvent dans une démarche complémentaire, il reste nécessaire de ne pas les associer systématiquement.

3.3.2 COMPARAISON DES BILANS AVEC LA BASE KBOB

3.3.2.1 : Nature de la base KBOB :

L'outil mis au point par l'association Suisse *KBOB* offre une autre approche de calcul des performances énergétiques pour un type de produit sur la même base de données *Ecoinvents* que le *Baubook* et sera disponible en Annexe 12.³² La base *KBOB* cumule toujours les énergies primaires renouvelables et non renouvelables des matériaux en y intégrant leur durée de vie par la prise en compte de leur durée d'amortissement. Elle n'intègre cependant pas les énergies nécessaires aux phases de transport, de chantier et d'entretien des matériaux et se limite donc au calcul du cumul des énergies nécessaires à la fabrication et à la destruction des produits. L'autre limite du programme est l'UF choisie : 1 kg, qui, nous l'avons vu, n'est pas l'UF la mieux adaptée aux simulations de l'énergie grise des matériaux isolants.

Elle intègre l'unité de mesure Ecopoints UPB, un outil intégrant des paramètres supplémentaires et défini par l'association comme étant « *une unité quantifiant les charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, du dépôt de résidus découlant du traitement des déchets ainsi que du bruit de la circulation* ». Les données relatives à l'énergie grise et au bilan CO₂ converties sous la forme d'Ecopoints UPB offrent donc une approche intéressante de l'impact environnemental des matériaux, par le nombre important de paramètres qu'elles intègrent.

3.3.2.2 Comparaison de solutions d'isolation classique :

Cependant, mis à part la paille, le liège et le lin, La base de données n'opère pas de distinction entre les isolants végétaux qu'elle regroupe sous l'appellation « *isolant végétal souple* ». Elle ne différencie également pas les panneaux rigides et souples. La masse volumique $\rho = 148 \text{ kg/m}^3$ attribuée à ce regroupement correspond à un isolant semi rigide du type *Multisol* ($\rho = 140 \text{ kg/m}^3$) et n'est donc pas représentative de la gamme importante des F-LDB. L'une des FDES de PAVATEX nous donne cependant les points UPB de 4 produits FDB pour une UF identique à celle de la base *KBOB* de 1 kg. Les Ecopoints UPB relatifs aux LDB resteront par défaut ceux figurant dans l'appellation « *isolant végétal souple* » de la base *KBOB*.

UF : 1 kg	UPB Total	UPB Fabrication	UPB Elimination	Masse volumique kg/m ³	λ CSTB W/m.K
Polyuréthane	6630	5110	1510	30	0,026
Polystyrène extrudé (XPS)	1080	9240	1570	32	0,039
Laine de verre	1690	1660	29,8	60	0,033
Laine de roche	1140	1110	29,8	60	0,035
Isolant végétal souple	860	816	43,6	148	0,04
FDB <i>Diffutherm</i> PAVATEX	954	543	411	180	0,045
Ouate de cellulose	418	332	86,2	60	0,04
Paille	562	562	0	100	0,07

Tableau 13 : Points UPB des étapes de divers matériaux isolants pour une UF = 1 kg

³² Annexe 12 : Base *KBOB* 2016 – KBOB p.a, OFCL, Berne, 2016 – Fichier XLS

Le tableau précédent récapitule les points UPB et la masse volumique de 8 isolants attribués par la base de données *KBOB 2016*, et par la FDES de PAVATEX pour l'un de ses produits : le *Diffutherm*, pour 1 kg de matière.³³ Pour chaque masse, une conductivité thermique issue de la base de données du CSTB a été attribuée.³⁴

Une conversion des données précédentes pour une UF de $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ peut être effectuée en considérant la masse volumique émise par la base *KBOB*, obtenue par moyenne lorsque des fourchettes sont proposées pour certains produits et la conductivité thermique proposée par le CSTB. Pour ce faire, il faut déterminer quelle est l'épaisseur de matériau nécessaire pour atteindre $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ en fonction de sa conductivité thermique puis de déterminer la masse de cet échantillon par rapport à la masse volumique de chaque matériau afin de la multiplier par les données Ecopoints présentées pour une UF de 1 kg.

Or, ces résultats seraient largement dépendants du choix de la masse volumique et de la conductivité thermique choisies pour chaque produit. Les masses volumiques proposées par la base *KBOB* peuvent contenir des fourchettes variant de manière très significative (de 1 à 5) pour certains d'entre eux. Ces résultats sont donc soumis à une interprétation « moyenne » dont les écarts entre les produits réels peuvent être très conséquents. Une confrontation des données de la base *KBOB* avec les informations relatives à la conductivité thermique et à la masse volumique, indiquées avec précision dans les fiches techniques de matériaux isolants commercialisés sur le marché, nous permettrait de palier à cette imprécision :^{35 et 36}

Isolant utilisé	Référence commercial	Fabricant	Lambda	M.v en kg/m ³	Ep. en mm pour R=5	Masse en kg. pour R=5
Polyuréthane	SOPRATHERM ALU	Soprema	0,023	34	0,115	3,91
Polystyrène Extrudé (XPS)	XPS EFIOS WFI 180	Soprema	0,036	35	0,18	6,3
Laine de verre	Isofacade 32 P	Isover	0,032	30	0,16	4,8
Laine de roche	Alphalène 50	Isover	0,035	50	0,175	8,75
LDB	Flex 40	Isover	0,038	55	0,19	10,45
FDB	Diffutherm	Soprema	0,046	180	0,23	41,4
Ouate de cellulose	Celflex	Isonat	0,039	50	0,195	9,75
Botte de paille	/	/	0,7	100	0,35	35

Tableau 14 : Conversion des données de matériaux d'après les fabricants pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Si l'on reprend les Ecopoints UPB du tableau précédent, que l'on effectue les conversions nécessaires pour obtenir leur masse pour $R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ des produits commercialisés, on obtient :

UF : $R = 5 \text{ kwh/m}^2$	UPB Total	UPB Fabrication	UPB Elimination
Polyuréthane	25884,2	19980,1	5904,1
Polystyrène extrudé (XPS)	68103	58212	9891
Laine de verre	8111,04	7968	143,04
Laine de roche	9973,25	9712,5	260,75
LDB	8982,82	8527,2	455,62
FDB	39495,6	22480,2	17015,4
Ouate de cellulose	4077,45	3237	840,45
Botte de paille	19670	19670	0

Tableau 15 : Conversion d l'UF de 1 kg pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ des données de la base *KBOB* appliquées aux matériaux du tableau 14

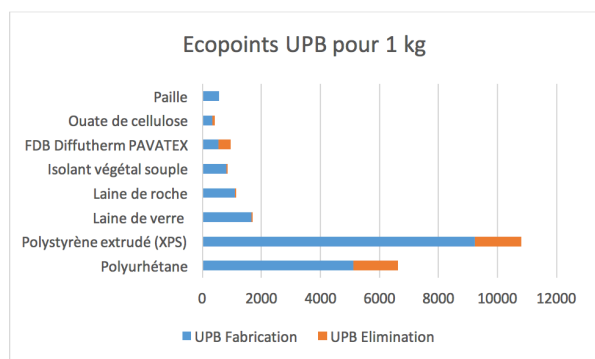
³³ Annexe 10 : *DEP Panneaux isolants en fibres de bois* – PAVATEX SA, IBU, Fribourg, 2010 – p. 19

³⁴ S. COURGEY, J-P OLIVA – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. – Terre vivante, Mens, 2010 – p. 242 à 244

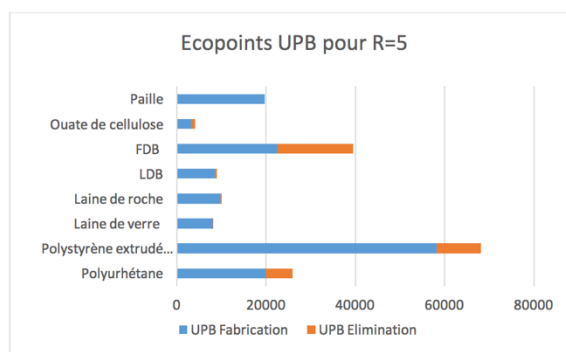
³⁵ Site internet – *ISOVER* – Disponible sur : <https://www.isover.fr/produits/catalogue>

³⁶ Site internet – *SOPREMA* – Disponible sur : <https://www.soprema.fr/fr/>

Une mise en graphique comparative des données du tableau 13 , soit les valeurs Ecopoints UPB directement issues de la base KBOB avec celles du tableau 15, soit les valeurs Ecopoints UPB de produits déterminés pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}^2$, peut nous aider à appréhender les différences selon l'UF :



Graphique 20 : Mise en graphique du tableau 14 : Ecopoints UPB de matériaux isolants pour une UF de 1 kg



Graphique 21 : Mise en graphique du tableau 16 : Ecopoints UPB de matériaux isolants pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$

Si l'on s'en tient à l'analyse de la comparaison pour l'UF = 1 kg, on constate que les isolants végétaux sont 6 à 12 fois moins impactants que les isolants synthétiques. Ces écarts se resserrent fortement lorsque l'on convertit les données pour une UF de $R=5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$. La raison étant l'influence de la masse volumique et des épaisseurs plus importantes nécessaires aux isolants végétaux pour atteindre une résistance thermique équivalente. Pour une UF de $R=5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$, Les LDB restent 4 fois moins impactantes que les FDB mais s'avèrent cette fois-ci avoir un impact environnemental équivalent aux laines minérales, même si celui-ci reste très inférieur à celui des solutions synthétiques.

Mise à part la paille, les écarts des Ecopoints UPB avec la base *Baubook* conservent sensiblement les mêmes ordres de grandeur pour la fabrication. En revanche, on observe que l'énergie nécessaire à l'élimination des produits synthétiques est proportionnellement beaucoup plus importante que celle des isolants minéraux ou biosourcés. Les données explorées dans la base *Baubook* devraient donc connaître une majoration dans des écarts équivalents si elles avaient pris en compte la phase d'élimination des produits.

Les bases de données *Baubook* et *KBOB*, même si elles utilisent une paramétrique différente, font globalement ressortir les mêmes ordres de grandeur concernant l'impact environnemental des matériaux isolants. Ainsi, l'empreinte environnementale des LDB reste semblable à celle des autres isolants biosourcés conditionnés sous forme de matelas et reste globalement moins impactante, dans des écarts pouvant aller de 1 à 6 pour une résistance thermique équivalente, que la plupart des solutions synthétiques ou minérales. En revanche les FDB, même si elles peuvent présenter un bilan CO_2 favorable en raison de leur densité élevée, restent une solution ayant une empreinte environnementale parmi les plus élevées des matériaux isolants.

3.3.3 ANALYSE COMPARATIVE DE PAROIS TYPES :

La comparaison avec une UF de $R = 5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ne prend pas en compte les spécificités du système constructif nécessaire à la pose des matériaux isolants et leur impact environnemental, ce qui peut nuancer les résultats examinés précédemment. Afin de tenter d'intégrer ce paramètre, une étude comparative prenant en compte les caractéristiques des matériaux et de leur système constructif habituel peut être effectuée en poursuivant 3 objectifs :

- Vérifier dans quelles proportions les caractéristiques de mise en œuvre d'un matériau isolant dans un système constructif peuvent nuancer les résultats de l'impact environnemental par rapport à une approche ne prenant en compte que sa résistance thermique.
- Mesurer la part de l'emprunte environnementale de l'isolant par rapport à l'ensemble du système constructif dans lequel il s'intègre.
- Prendre en considérations les caractéristiques et épaisseurs réelles des matériaux dans leur mise en œuvre.

3.3.3.1 Méthodologie :

Cette partie simulera l'impact environnemental de plusieurs systèmes de parois type intégrant les LDB et FDB à travers deux systèmes constructifs distincts : un support béton (en ITE) et une ossature bois pour 1 m^2 de paroi ayant une performance totale de $R=5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$. Les deux systèmes constructifs intégreront une solution LDB ou bien mixte LDB + FDB, la comparaison s'établira donc sur 4 solutions. Pour ce faire, les matériaux *Flex 40* et *Diffutherm* analysés précédemment seront comparés en utilisant leurs dimensions commerciales. Ensuite, une simulation vérifiant les épaisseurs d'isolants nécessaires afin d'atteindre une performance totale de paroi proche de $R = 5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ (soit $U \text{ paroi} = 0,2$) pour chaque système sera réalisée à l'aide de l'outil PHPP. Une fois la masse, les épaisseurs et la conductivité thermique de chaque produit connues, la même méthode de calcul que celle du 3.3.2 sera appliquée afin de dresser un écobilan par la somme des points UPB de l'ensemble du système constructif.

Les données liées à la masse volumique et aux performances thermiques concernant les autres matériaux nécessaires au système constructif (paroi en béton, montants etc..) seront issues de la base *KBOB* ou du *CSTB*. Afin de se concentrer sur les résultats de l'analyse d'un système intégrant un isolant, seul le système porteur, l'isolant et les éléments nécessaires à leur pose seront pris en compte afin d'éliminer toute variable supplémentaire. L'épaisseur de la paroi en béton porteuse est jugée fixe (20 cm) dans la comparaison des solutions 1 et 2. Celle de l'ossature bois porteuse des solutions 3 et 4 sera déterminée par l'épaisseur d'isolation à intégrer entre les montants pour obtenir $R = 5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$. Bien que les systèmes constructifs choisis ne soient pas forcément les plus performants d'un point de vue constructif ou environnemental, ils restent représentatifs d'un grand nombre de solutions courantes.

3.3.3.2 Composition et épaisseur des 4 parois types :

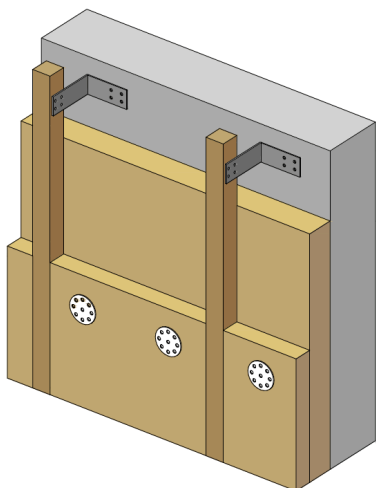


Illustration 11 : Solution 1 : Isolation LDB avec support en béton

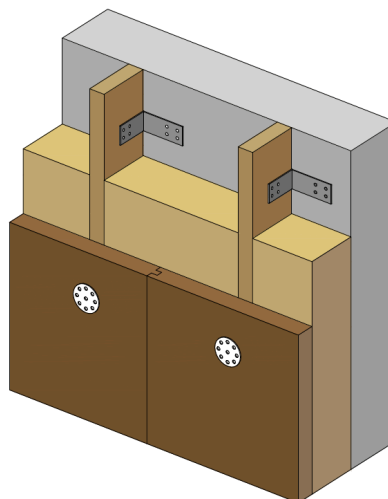


Illustration 12 : Solution 2 : Isolation LDB + FDB avec support en béton

Composition et épaisseurs pour $R=5$ soit $U=0,2W/m^2K$:

N° de la paroi	Description de la paroi					Isolation intérieure?
5	Laine de Bois					
Résistance superficielle [m²K/W]		intérieure R _{si} :	0,04			
		extérieure R _{se} :	0,13			
Section 1	λ [W/(mK)]	Section 2 (optionnelle)	λ [W/(mK)]	Section 3 (optionnelle)	λ [W/(mK)]	Epaisseur [mm]
1. Béton armé	2,300					200
2. Flex 40	0,038					120
3. Flex 40	0,038	Montants	0,130			80
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
Pourcentage de surface de la section 1		Pourcentage de surface de la section 2		Pourcentage de surface de la section 3		Total
90%		10,0%				40,0 cm
Majoration de la valeur U		Valeur U :		0,192		W/(m²K)

Tableau 16 : épaisseurs de la solution 1 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016.

N° de la paroi		Description de la paroi		Isolation intérieure?						
6		LDB + FDB		<div></div>						
Résistance superficielle [m²K/W]		intérieure R_{si} :		0,04						
		extérieure R_{se} :		0,13						
Section 1		λ [W/(mK)]	Section 2 (optionnelle)		λ [W/(mK)]	Section 3 (optionnelle)		λ [W/(mK)]	Epaisseur [mm]	
1. Béton armé		2,300							200	
2. Flex 40		0,038	Montants		0,130				160	
3. Diffutherm		0,045							60	
4.										
5.										
6.										
7.										
8.										
Pourcentage de surface de la section 1		Pourcentage de surface de la section 2		Pourcentage de surface de la section 3		Total				
90%		10,0%				42,0		cm		
Majoration de la valeur U		W/(m²K)		Valeur U:		0,196		W/(m²K)		

Tableau 17 : épaisseurs de la solution 2 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016.

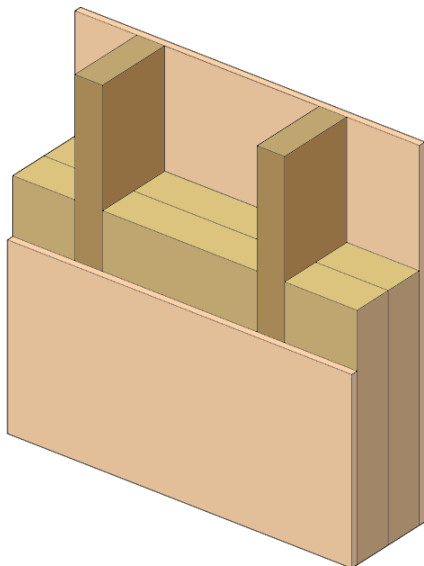


Illustration 13 : Solution 3 : Isolation LDB avec ossature bois

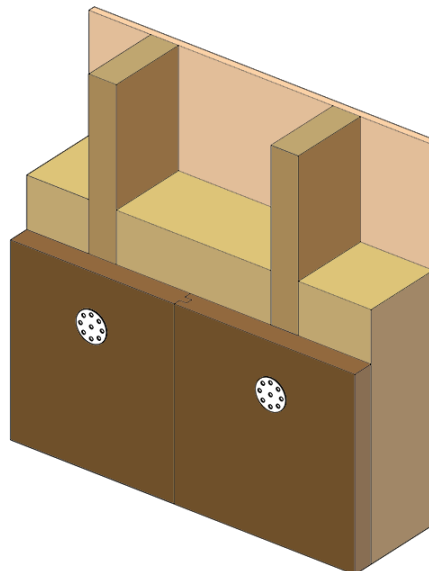


Illustration 14 : Solution 4 : Isolation LDB + FDB avec ossature bois

Composition et épaisseurs pour $R=5$ soit $U=0,2W/m^2K$:

N° de la paroi	Description de la paroi	Isolation intérieure?							
3	LDB								
Résistance superficielle [m^2K/W]		intérieure R_{si} :		0,04					
		extérieure R_{se} :		0,13					
Section 1		λ [$W/(mK)$]	Section 2 (optionnelle)		λ [$W/(mK)$]	Section 3 (optionnelle)		λ [$W/(mK)$]	Epaisseur [mm]
1.	Panneau OSB	0,130							18
2.	Flex 40	0,038	Montants bois		0,130				120
3.	Flex 40	0,038	Montant bois		0,130				120
4.	Panneau OSB	0,130							18
5.									
6.									
7.									
8.									
Pourcentage de surface de la section 1		84%		Pourcentage de surface de la section 2		16,0%		Pourcentage de surface de la section 3	
Majoration de la valeur U				Valeur U:		0,197		W/(m²K)	
								Total	
								27,6 cm	

Tableau 18 : épaisseurs de la solution 3 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016.

N° de la paroi	Description de la paroi	Isolation intérieure?							
4	LDB + FDB								
Résistance superficielle [m^2K/W]		intérieure R_{si} :		0,04					
		extérieure R_{se} :		0,13					
Section 1		λ [$W/(mK)$]	Section 2 (optionnelle)		λ [$W/(mK)$]	Section 3 (optionnelle)		λ [$W/(mK)$]	Epaisseur [mm]
1.	Panneau OSB	0,130							18
2.	Flex 40	0,038	Montants bois		0,130				180
3.	Diffutherm	0,046							60
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
Pourcentage de surface de la section 1		84%		Pourcentage de surface de la section 2		16,0%		Pourcentage de surface de la section 3	
Majoration de la valeur U				Valeur U:		0,192		W/(m²K)	
								Total	
								25,8 cm	

Tableau 19 : épaisseurs de la solution 4 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016.

3.3.3.3 Mesure des Ecopoints UPB des matériaux nécessaires au système constructif d'après les base de données KBOB³² et CSTB³⁴ :

Composition du mur en béton des solutions 1 et 2 :

Epaisseur : 200 mm

Masse volumique : 2 300 kg/m³

Conductivité thermique : 2,3 W/m²K

Masse sur l'échantillon : 460 kg

- UPB Total/ kg (en considérant 1% de la masse volumique en armature) :
- UPB Béton : $94,3 \times 455,4 = 42\,990$ Ecopoints
- UPB Armature : $2860 \times 4,6 = 13\,156$ Ecopoints
- UPB total pour 1 m² : $42\,990 + 13\,156 = \underline{56\,446}$ Ecopoints.

Montants en bois :

Les sections en bois utilisées dans les 4 solutions sont considérées comme issues de bois résineux, épicéa ou mélèze ayant une masse volumique de 485 kg/m³, une conductivité thermique de 0,13 W/m²K et un UPB Total de 424 Ecopoints/kg.

Les montants des solutions 1 et 2 sont maintenus à la paroi par 2 fourrures /m² en acier galvanisé d'un poids total de 0,4 kg.

- UPB acier/ kg : 16 100
- UPB pour la masse totale : $0,4 \times 16\,100 = \underline{6\,440}$ Ecopoints

Montants en bois dans la solution 1 :

Section : 5 x 8 cm (2 pièces)

Volume équivalent : équivalent à une épaisseur de 0,8 cm pour une surface de 1m²

Masse équivalente : 3,88 kg

- UPB pour les montants : $424 \times 3,88 = \underline{1645}$ Ecopoints

Montants en bois dans la solution 2 :

Section : 5 x 16 cm (2 pièces)

Volume équivalent : équivalent à une épaisseur de 1,6 cm pour une surface d'1 m²

Masse équivalente : 7,76 kg

- UPB pour les montants : $424 \times 7,76 = \underline{3290}$ Ecopoints

Montants en bois dans la solution 3 :

Section : 24 x 8 cm (2 pièces)

Volume équivalent : équivalent à une épaisseur de 3,84 cm pour une surface de 1m²

Masse équivalente : 18,624 kg

- UPB pour les montants : $424 \times 18,624 = \underline{7897}$ Ecopoints

Montants en bois dans la solution 4 :

Sections : 18 x 8 cm (2 pièces)

Volume équivalent : équivalent à une épaisseur de 2,88 cm pour une surface d'1 m³

Masse équivalente : 13,968 kg

- UPB pour les montants : $424 \times 13,968 = \underline{5922 \text{ Ecopoints}}$

Cheilles :

Les isolants des solutions 1, 2 et 4 seront fixés par l'intermédiaire de 4 chevilles plastique .:

Masse totale : 0,08 kg.

- UPB total / kg : 8240
- UPB pour la masse totale : $8240 \times 0,08 = \underline{659 \text{ Ecopoints.}}$

Panneau OSB :

Epaisseur : 18 mm

Masse volumique : 605 kg/m³

- UPB total / kg : 893
- UPB pour 1 m² : $605 \times 0,018 \times 893 = \underline{9724 \text{ Ecopoints.}}$

3.3.3.4 Résultats :

Le calcul des écopoints UPB liés à chaque système constructif, hors isolant, nous permet d'établir le tableau suivant :

Système constructif	Eléments pris en compte	UPB Totaux système constructif	UPB Total système constructif
Solution 1	Béton - Montants - <u>Fourures</u> - Chevilles	56 446 + 1 645 + 6 440 + 659	65190
Solution 2	Béton - Montants - <u>Fourures</u> - Chevilles	56 446 + 3290 + 6 440 + 659	66835
Solution 3	Montants - OSB x 2	7897 + 19 448	27345
Solution 4	Montants - OSB x 1 - Chevilles	5922 + 9724 + 659	16305

Tableau 20 : Evaluation des Ecopoints UPB des systèmes constructifs des 4 solutions

Les caractéristiques concernant l'isolant sont reprises dans le tableau suivant :

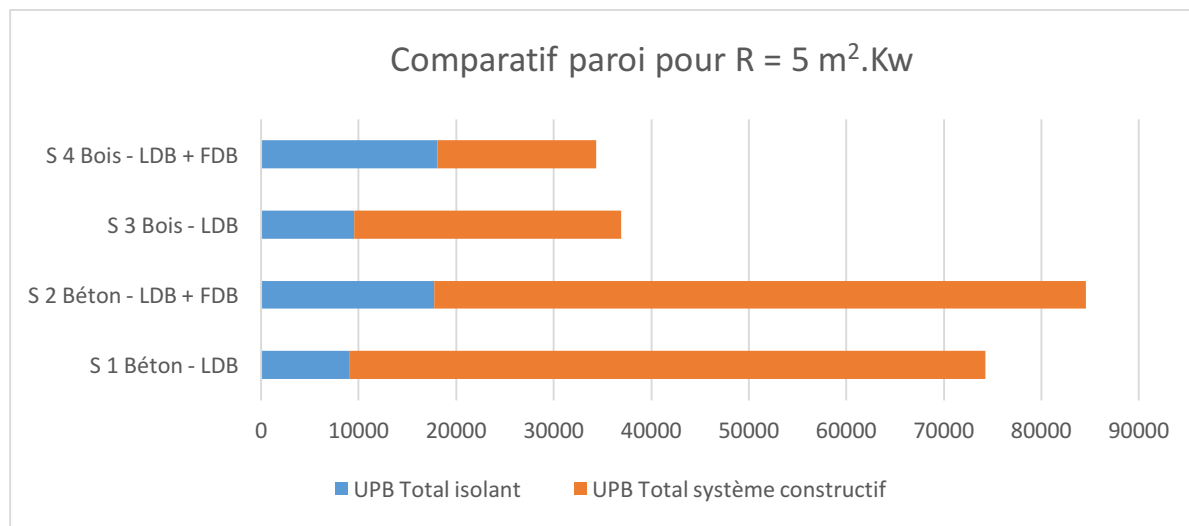
Isolation	Equivalent ep. isolant sans montants en m	M.v en kg/m3	Masse matériau en kg (Mv x ep.)	UPB Total / kg	UPB Total isolant
Solution 1	0,192	55	10,56	860	9081,6
Solution 2 (LDB)	0,144	55	7,92	860	6811,2
Solution 2 (FDB)	0,06	180	10,8	1010	10908
Solution 3	0,202	55	11,11	860	9554,6
Solution 4 (LDB)	0,151	55	8,305	860	7142,3
Solution 4 (FDB)	0,06	180	10,8	1010	10908

Tableau 21 : Evaluation des Ecopoints UPB de l'isolation des systèmes constructif des 4 solutions

Enfin, le cumul des écopoints UPB des isolants avec leur système constructif peut être appréhendé à l'aide du tableau et du graphique suivants :

TOTAL	UPB Total isolant	UPB Total système constructif	UPB TOTAL PAROI
Solution 1	9081,6	65190	74271,6
Solution 2	17719	66835	84554
Solution 3	9554,6	27345	36899,6
Solution 4	18050,3	16305	34355,3

Tableau 22 : Evaluation des Ecopoints UPB total des systèmes constructifs des 4 solutions



Graphique 22 : Mise en graphique de l'évaluation des Ecopoints UPB total des systèmes constructifs des 4 solutions

3.3.3.4 : Interprétation des résultats :

Ainsi, l'on constate dans un premier temps que les systèmes porteurs en béton ont un écobilan deux fois plus élevé que les ossatures bois. Dans la solution 4, l'isolant représente le poste de consommation majoritaire, avec 52% des Ecopoints UPB du système constructif contre seulement 25% pour la solution 3. Au niveau des Ecopoints UPB de l'isolant, les solutions mixtes restent en moyenne 40% plus impactantes que les solutions LDB en raison du fort impact environnemental des FDB. Or, la solution mixte 4 reste légèrement moins impactante que la solution LDB 3. La raison en est que les sections plus importantes des montants en bois de la solution 3 génèrent un impact environnemental plus conséquent tout en diminuant la résistance thermique de la paroi qu'il faut compenser par des épaisseurs plus importantes afin d'obtenir une résistance thermique équivalente.

Les mauvaises performances de l'écobilan des FDB restent donc à relativiser. LE PHPP montre que, d'un point de vue constructif, la disposition en continu du matériau offre un gain énergétique de près de 10% au niveau de la conductivité thermique par rapport à une LDB encadrée entre montants. Cette valeur compense largement la conductivité thermique plus faible des FDB, la solution 3 étant plus épaisse et moins performante que la solution 4, comme le montre le calcul PHPP. Ce constat ne remet pas en cause les observations précédentes concernant l'énergie grise et le bilan CO₂ des matériaux mais démontre que les écobilans de matériaux isolants sont largement subordonnés au système constructif pour deux raisons :

- Premièrement, l'impact environnemental de l'isolation n'a que peu d'influence sur l'écobilan d'une paroi (cette simulation, de plus, ne prend pas en compte les parements intérieurs et extérieurs de la paroi).
- Une application adéquate (sur une surface continue) peut compenser les mauvaises performances environnementales d'une FDB par rapport à une LDB ayant une conductivité thermique plus faible mais dont l'encastrement entre montants génère un écobilan élevé.

Les paramètres et l'unité fonctionnelle différents de chaque base comparative utilisée ne permettent pas une comparaison aisée entre leurs résultats respectifs. Néanmoins, la base *Baubook* démontre que les produits les moins transformés ont globalement l'énergie grise la plus faible et le bilan CO₂ le plus valorisant. Les résultats des Ecopoints menés avec la base *KBOB* montrent que la prise en compte de la phase d'élimination des matériaux vient encore renforcer ces écarts.

Ainsi, Les LDB ont une énergie grise et un bilan CO₂ qui se situent dans la moyenne des isolants végétaux conditionnés sous forme de matelas, globalement plus valorisante que toutes les autres solutions isolantes synthétiques ou minérales. Cependant, les FDB conservent une position beaucoup moins avantageuse. En effet, l'énergie grise de procédé qu'elle requiert, pour une performance thermique équivalente, est 3 à 5 fois plus élevée que celle des LDB et reste comparable à celle des matériaux les plus énergivores. Cet écart ayant été mesuré et corrélé aussi bien dans les FDES, la base *Baubook* et la base *KBOB*. Même si les FDB disposent d'un bilan CO₂ valorisant en raison de leur densité élevée, leur énergie grise importante pénalise fortement le matériau que l'on peine, à première vue, à inscrire dans un schéma de développement durable.

On note que la gamme des F-LDB étant très étendue et aux propriétés progressives, il reste important d'évaluer les performances de chaque produit individuellement étant donné la nature importante des écarts entre les LDB et les FDB.

Enfin, une analyse comparative de l'impact environnemental intégrant un système porteur montre que les résultats comparatifs établis pour une UF théorique de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ doivent être confrontés à ceux d'une comparaison prenant en compte le dispositif constructif dans lequel le matériau isolant s'inscrit. En effet, dans certains cas, une mise en œuvre continue d'une FDB peut compenser ses plus faibles performances thermiques et environnementales.

De manière générale, les résultats générés par ces outils ne doivent pas faire l'objet d'une surinterprétation, les marges d'erreur cumulées, induites par une certaine approximation des valeurs d'entrée et le grand nombre de paramètres pris en compte peuvent avoir une incidence significative sur les résultats à l'échelle d'un m² de paroi et plus encore à l'échelle d'un bâtiment. L'utilisation des résultats de ces analyses ne peut donc aider à la prise de décision que lorsqu'ils sont caractérisés par des écarts suffisamment significatifs.

Ce mémoire a tenté d'illustrer les atouts et les points faibles d'un éco-matériau, les F-LDB, et de sa filière à travers trois champs distincts mais complémentaires, afin d'en mesurer le potentiel à travers leurs qualités techniques et leurs caractéristiques dans le spectre d'analyse du développement durable, dans la transition énergétique et écologique. Ce travail m'a également permis d'appréhender le nombre important de paramètres entrant dans la réflexion, de leur interaction et des contradictions qu'ils peuvent générer, afin de légitimer la prise de décision par rapport au choix d'une solution isolante dans le bâtiment. Il apparaît que le matériau et sa filière sont confrontés à plusieurs problématiques dont la nature, la difficulté pour y apporter des améliorations ou bien la temporalité dans laquelle elles s'inscrivent, différent. Cela rend ainsi la comparaison et la hiérarchisation de leurs impacts complexe, même si certaines peuvent présenter un caractère de priorité prépondérant.

Les caractéristiques affectant le matériau dans les domaines des sciences des matériaux, les F-LDB ont des performances thermiques et mécaniques qui s'inscrivent dans la moyenne des isolants biosourcés, ce qui ne leur offre pas, au premier abord de points distinctifs. Les F-LDB possèdent néanmoins d'excellentes propriétés au niveau de l'inertie thermique et une bonne hygroscopicité, ce qui en valorise le potentiel d'utilisation si ces deux éléments sont requis au niveau du projet. Un autre aspect distinctif par rapport à leurs homologues biosourcés est la grande variété de la gamme de produits disponibles, tant sur le plan du poste à remplir que des dimensionnements disponibles. Ainsi l'isolant s'adapte, dans une bonne mesure, au procédé constructif et non l'inverse, ce qui en démultiplie le potentiel d'utilisation. Les LDB et FDB offrent par ailleurs de bonnes caractéristique de complémentarité dans leur mise en œuvre, surtout dans le cas d'une ossature bois, par la pose d'une couche continue de FDB supprimant les ponts thermiques liés au montants et par l'inertie importante qu'elles y apportent. Mise à part leur mauvaise réaction au feu compliquant leur employabilité sur des projets de grande envergure, ou leur faible résistance à l'humidité persistante engendrant certaines précautions d'emploi, les aspects techniques propres au matériau ne révèlent pas de problématiques majeures compromettant le développement à venir de cette solution sur le territoire

Ces qualités techniques leur permettent d'être, avec la ouate de cellulose, la solution biosourcée privilégiée à l'heure actuelle. En effet, le secteur connaît une croissance importante de l'ordre de 10% par an ces 4 dernières années, même si leur part de marché ne correspond qu'à 3% ou 4% du m² d'isolant posé en 2016. A l'inverse de nombreuses filières de produits isolants biosourcés, la production des F-LDB s'avère particulièrement bien structurée et dominée par des entreprises d'envergure européenne, aux activités polyvalentes. Outre la production d'une gamme étendue, ce modèle industriel permet de valoriser son potentiel d'utilisation à venir par une visibilité et une disponibilité importantes des matériaux ainsi que par une Recherche et Développement stimulée, autant d'éléments encourageant le développement de la filière. L'expérience des pays scandinaves, où la filière est historiquement très bien implantée, démontre néanmoins que la part de marché des F-LDB se stabilise autour de 10% du marché total.

Ce modèle industriel connaît cependant plusieurs limites. En effet, il est de nature hautement concurrentiel, caractérisé par des stratégies de distribution à l'échelle européenne et des activités polyvalentes des principaux acteurs pouvant générer des conflits d'intérêt. Même si ces problématiques ne sont pas des freins directs au développement de la filière, elles posent la question de sa durabilité économique tant au niveau retombées au niveau local que dans son ouverture à de nouveaux acteurs permettant une production plus décentralisée.

Outre les bonnes performances de l'énergie grise et du bilan CO₂ des LDB par rapport à un grand nombre de solutions synthétiques et minérales, les F-LDB possèdent des caractéristiques durables intéressantes au niveau de la ressource bois, composant majoritairement les matériaux. Lorsqu'il ne s'agit pas de l'exploitation directe de BO-P, la ressource utilisée entre dans une démarche de revalorisation d'un sous produit, qu'il s'agisse du BIBE directement prélevé en forêt ou bien des PCS, issues des chutes de découpe en scierie. Cette ressource est également prélevée dans un rayon inférieur à 160 km et provient de forêts, à la gestion durable certifiée pour chaque fabricant. De plus, à l'exception des FDB bituminées ou des LDB les plus souples, le matériau présente plusieurs solutions : le compostage, la revalorisation énergétique, le stockage ou l'enfouissement présentant moins de risques pour l'environnement que les solutions synthétiques et minérales. Cependant, il apparaît difficile d'envisager une augmentation de l'activité, en raison de la faible disponibilité nette supplémentaire actuelle et future de la ressource forestière. En effet, même si l'industrie des F-LDB ne représente que 1% de la ressource prélevée, elle représente l'équivalent de près de 70% de la disponibilité nette supplémentaire actuelle, rendant difficile toute augmentation d'une activité exploitant cette ressource. Les PCS offrent alors une piste intéressante, caractérisée par un potentiel de production en augmentation jusqu'en 2035 mais dont la production actuelle diminue. Même si les entretiens réalisés avec les représentants des fabricants révèlent qu'il n'existe aucun problème de disponibilité à court et moyen terme, la difficulté d'ajuster l'échelle pluri-décennale nécessaire à la génération de la ressource, avec le caractère instable de l'appareil productif, rend complexe toute projection à long terme.

Même si le modèle de production et la disponibilité de la ressource connaissent certaines limites, le frein principal semble être, à l'heure actuelle, de nature socio-politique et extérieur à la filière : le manque encore trop présent de la prise en considération de la question environnementale dans la construction, aussi bien de la part des maîtres d'ouvrages, des acteurs du bâtiment que des pouvoirs publics. Il peut se traduire, au niveau des acteurs du bâtiment, par une certaine inertie induisant une résistance aux changements intégrant de nouvelles pratiques. On peut en observer les effets par la seule prise en considération du coût de construction, désavantageant au sens strict les F-LDB, ne prenant pas en compte les qualités « non marchandes » du matériau. Le manque de qualifications des artisans poseurs dans la pose des F-LDB est également un handicap souligné à plusieurs reprises dans les entretiens, diminuant leur employabilité.

Enfin, les pouvoirs publics encouragent la transition énergétique par la mise en place d'une réglementation toujours plus exigeante et des incitants financiers destinés à la soutenir. Cependant, ces dispositions nationales ne prennent, pour l'heure, pas en compte les caractéristiques liées à l'énergie grise des matériaux, même si des incitants régionaux existent. Les entretiens révèlent cependant unanimement qu'un progrès considérable au niveau de l'appréhension sociale et politique de la problématique environnementale ont été réalisés ces 20 dernières années, surtout au niveau de la maîtrise d'ouvrage publique, même si ces changements s'exercent encore trop lentement.

Malgré les différentes problématiques évoquées, les F-LDB dans leur ensemble, mais surtout les LDB, disposent d'un potentiel à venir à court et moyen terme intéressant, comme l'attestent les entretiens et les recherches, par la croissance actuelle du secteur et la considération progressive, mais encore lente, des acteurs et du grand public de la question environnementale et des éco-matériaux. Même s'il reste difficile d'évaluer son impact, la disponibilité future de la ressource forestière nationale pourrait être à long terme le frein prédominant et engendrer une importation de la ressource allant à l'encontre de la démarche durable et territoriale défendue par les fabricants.

Enfin, Les F-LDB sont caractérisées par des modèles de production, des applications et des appréciations différentes des acteurs, affectant leur potentiel à venir de manière différente. En effet, les FDB s'avèrent avoir recours à une production 3 à 6 fois plus énergivore que les LDB pour une résistance thermique équivalente $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, d'après les FDES émises par les fabricants ou la base de données *Baubook*. Cet écart se répercute, dans des proportions équivalentes, sur leur prix et donc sur leur attractivité. Les entretiens ont par ailleurs révélé que leur mise en œuvre s'avère être plus contraignante et donc plus onéreuse que pour des LDB. Ces matériaux offrent également moins de possibilités au niveau de la R & D, mise à part une part plus conséquente des énergies renouvelables dans le processus de production, quand les LDB peuvent par exemple connaître des améliorations sur la nature des liants utilisés ou du mixage avec d'autres matériaux. Cet ensemble de paramètres en atténue le potentiel à venir, même si ce discours doit être nuancé. En effet, le produit s'inscrit dans des domaines d'application plus spécifiques et ne joue pas uniquement le rôle de bouclier thermique. Ensuite, l'analyse comparative effectuée en sous-partie 3.3.3 démontre que l'évaluation de l'énergie grise doit tenir compte de la disposition constructive des produits, ce qui peut nuancer les résultats d'une analyse comparative basée uniquement sur une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Les thématiques évoquées dans ce mémoire ne prennent généralement en compte que l'étude du matériau seul. Même si les analyses et observations effectuées selon cette approche permettent d'évaluer les qualités intrinsèques du matériau, celles-ci ne doivent pas être interprétées de manière empirique. En effet, pour de nombreuses thématiques, le rôle du système constructif, de la classe climatique ou même de la fonction propres à chaque projet, sont autant de paramètres pouvant influencer ou même contredire les résultats. Il est donc nécessaire de confronter ces paramètres théoriques à l'ensemble des caractéristiques du terrain, propre à chaque projet afin de légitimer la prise de décision.

Ouvrages, documents et études :

- *Approche de la valorisation actuelle des produits connexes de la filière bois-forêt en Lorraine* – ADEME, Gipeblor, CRITT – 38 pages.
- BASLER Ernst, WERNER Frank – *Construire et habiter avec la nature* – PAVATEX SA, Zurich, 2016 – 28 pages.
- BESSE Pierre, VALKHOFF Hanz, FLOISSAC Luc – *Projet de recherche TERRACREA* – Laboratoire de recherche de l'ENSAT, Toulouse, 2014 – 182 pages.
- BOUCHIE Rémy, BUSSON Benoît, CORMIER Benoît, DELAIRE Aurélie, FARKH Salem, LEGUILLON, Frank – *Performance énergétique : les matériaux et procédés d'isolation* – CSTB Editions, Marne-la-Vallée, 2013 – 458 pages.
- BOUSQUET Vincent (Dir.) – *Diversité biologique des forêts* – (Extrait), IGN, 2015
- BOYEUX Bernard (Dir.) - *Les filières franciliennes des matériaux et produits biosourcés pour la construction : propositions d'action* – ARENE, Paris, 2014 – 72 pages.
- COLIN Antoine, THIVOLE-CAZAT Alain – *Etude Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*. ADEME, IGN, FCBA – 91 pages.
- COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre – *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. –Terre vivante, Mens, 2010 – 255 pages.
- DEROMBISE Guillaume (Dir.) – *Structuration et développement des filières de matériaux biosourcés : plan d'action numéro 2, avancées et perspectives* –Karibati, Paris, 2016 – 52 pages.
- *Documentation technique des façades* –PAVATEX SA, 2018 – 26 pages
- *Enquête nationale de la construction bois : Activité 2016* – CODIFAB (Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois), Paris, 2017 – 8 pages.
- FENNETEAU, Hervé – *Enquête : entretiens et questionnaires* – Deuxième édition, Dunod, Paris, 2015 – 128 pages.
- GALLAUZIAUX Thierry, FEDULLO David – *Le grand livre de l'isolation* – Eyrolles, Paris, 2012 – 678 pages
- GALMICHE Véronique – *Isolants biosourcés : points de vigilance* – Paris, Agence Qualité Construction, 2016 – 64 pages.
- GIPEBLOR et le CRITT Bois - *Approche de la valorisation actuelle des produits connexes de la filière bois-forêt en Lorraine* – ADEME, 38 pages
- GROSSELIN Jean-Michel (Dir.) - *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction* – Paris, Nomadéis, 2012 – 101 pages.
- GRUESCU Ion, MENET Jean-Luc – *Utilisation de la méthodologie d'Analyse du cycle de vie (ACV) pour le choix des matériaux d'un élément de construction* – Lille, Université Lille I, 2013 – 5 pages.
- Henriette MICHAUX, Dimitri SCHMITZ – *Matériaux, Air et Eau* – Cours de BAC 1, Université de Liège, 2012 – 26 pages
- Henriette MICHAUX, Dimitri SCHMITZ – *Matériaux et chaleur* – Cours de BAC 1, Université de Liège, 2012 – 73 pages.
- *Les filières de construction de matériaux biosourcés : plans d'actions, avancées et perspectives* – C&B (Construction et Biosourcerie), Maillot, 2016 – 24 pages

- *Les isolants thermiques pour le bâtiment en 2017 en France* – TBC (Extrait), Toulouse, 2017 – 23 pages.
- MERLE-LAMOOT Nicole, PANNETIER Gilles, – *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolution à échéance 2020* –PIPAME (Pôle Interministériel de Prospective et d’Anticipation des Mutations Economiques), Paris, 2012 – 204 pages.
- *Mise en œuvre des produits Pavatex* – PAVATEX SA, Fribourg, 2014 – 84 pages
- *Prescription de mise en œuvre des panneaux support d’enduit pour ITE* – STEICO SE, Brumath 2016 – 24 pages
- *Prescriptions de mise en œuvre des panneaux pare-pluie* – STEICO SE – 2016 – 16 pages
- *Prescriptions de mise en œuvre Steico flex* – STEICO SE, 2016 – 16 pages
- PUILLAUDE Agnès – *Le cout des matériaux biosourcés dans la construction : état de la connaissance 2016* – CEREMA, 2017 – 32 pages.
- *Quand devez vous isoler ?* – ADEME, Paris, 2018 – 13 pages.
- RUDINGER Andreas – *La rénovation thermique des bâtiments en France et en Allemagne : quels enseignements pour le débat sur la transition énergétique ?* –Science Po, Paris, 2013 – 14 pages
- SÉDILLOT Béatrice – *Récolte de bois et production de sciages en 2017* – Agreste, Paris, 2018 – 28 pages.
- SIDLER Olivier – *La rénovation thermique des bâtiments : enjeux et stratégies* – Enertech, Mèze, 2012 – 123 pages.
- *Les isolants thermiques pour le bâtiment en 2017 en France* – TBC (Extrait), Toulouse, 2017 – 23 pages.

Thèses :

- CHAHWANE Layal – *Thèse « Valorisation de l’inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments »* – Grenoble, Université de Grenoble I, 2011 – 192 pages.
- HOBALLAH Mohamad Hussein, NDIAYE Amadou, MICHAUD Franck, IRLE Mark - *Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge: Application to wood-based insulating materials* – Ecole supérieure du bois, Nantes, Elsevier, 2017 – 105 pages
- LUX Jérôme – *Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes: étude basée sur l’analyse d’images tridimensionnelles* – Université Sciences et Technologies, Bordeaux, 2005 – 172 pages
- KAEMMERLEN Aurélie – *Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment* - Université Henri Poincaré, Nancy, 2009. – 258 pages.

Conférence :

- LEPAGE Maxime – *Conférence sur le label Bâtiment Biosourcé*, – CERTIVEA, 2014 – [en ligne le 10/12/2018] Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=2M8UI_TO4r8

Emission :

- *Cash investigation : Razzia sur le bois, les promesses en kit des géants du meuble* – Emission de télévision animée par Elise LUCET, France 2, 2017.

Sites Internet :

- Site internet – *Produit Flex 40, ISONAT* – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.isonat.com/actualites/isonat-flex-40-lisolant-bio-source-le-plus-economique-du-marche>
- Site internet – *Produit Holz Flex, HOMATHERM* – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : http://www.ecobouw.be/homatherm/download/Anwendungsbroschuere_FR.pdf
- Site internet – *Cancer environnement* – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <http://www.cancer-environnement.fr/525-Acetaldehyde.ce.aspx>
- Site internet – ASIV – [en ligne le 10/12/2018] – Disponibles sur : <https://www.aimcc.org/union/asiv-isolants-vegetaux>
- Site internet – CSTB – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <http://evaluation.cstb.fr/fr/declarations-environnementales/>
- Site internet – FIBRANATUR – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <http://www.fibranatur.com/mentions-legales.php>
- Site internet – ISONAT – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.isonat.com/nouvelle-usine-100-fibres-de-bois-roanne>
- Site internet – EFFIREAL – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <http://www.effireal.com/la-scop-effireal/>
- Site internet – STEICO – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.steico.com/fr/le-groupe-steico/production/>
- Site internet – PAVATEX – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.pavatex.ch/fr/contact/>
- Site internet – Portail du Ministère de l'Economie – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : www.economie.gouv.fr/entreprises/definition
- Site internet – Traces écrites – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.tracesecritesnews.fr/actualite/l-essentiel-de-l-actualite-economique-de-l-est-vu-par-traces-ecrites-news-87749>
- Site internet – Section Actualité de Steico France – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.steico.com/fr/actu/actualites/>
- Site internet : Références – PAVATEX – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.soprema.fr/fr/article/reference/lycee-sud-loire-de-clisson-concept-d-energie-positive>
- Site internet – Administration française – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F1224>
- Site internet – Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/recherche?form_build_id=&form_id=solr_query_form&query=RT2012
- Site internet – Plan Bâtiment Durable – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <http://www.planbatimentdurable.fr/experimenter-la-future-reglementation-le-label-e-c-r222.html>

Table des illustrations :

- Illustration 1 : ISONAT - *Matelas de LDB souple Isonat Flex 55* – [en ligne le 10/12/2018]
Disponible sur : <http://www.materiaux-ecologique-decoration.fr/fibre-de-bois-flexible-souple/28-panneau-isonat-laine-de-bois-et-chanvre-55-kg-m3.html>
- Illustration 2 : STEICO – *Procédés de pose de la LDB Steico Flex entre ossature (à gauche), en doublage ITE (au centre) et en plancher (à droite)* – Disponible dans l'ouvrage *Prescriptions de mise en œuvre Steico flex* – STEICO SE – 2016 – 16 pages
- Illustration 3 : STEICO – *Panneau de FDB SEICO Universal* – [en ligne le 10/12/2018] –
Disponible sur : <https://www.les-e-materiaux-verts.com/panneau-rigide-en-fibre-de-bois-steico>
- Illustration 4 : STEICO – *Procédé de mise en œuvre des FDB en ITE murale (à gauche), en pare-pluie pour toiture (au centre) et en système à lambourdes intégrées (à droite)* – Disponible dans le guide *Prescriptions de mise en œuvre des panneaux isolants Steico* – STEICO SE – 2016 – 35 pages
- Illustration 5 : LUX Jérôme – *Vue macroscopique d'un isolant en fibre de bois* – Disponible dans la Thèse : *Comportement thermiques macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes* – Université Sciences et Technologie, Bordeaux, 2009 – 172 pages.
- Illustration 6 : Henriette MICHAUX, Dimitri SCHMITZ – *Caractéristiques physiques des transferts de chaleur à travers des matériaux alvéolaires (à gauche) et Fibreux (à droite)* – Disponible dans les cours de BAC 1 à la section : *Matériaux et chaleur* – Université de Liège, 2012 – 73 pages.
- Illustration 7 : GALMICHE Véronique – *Dégradation irréversible des propriétés physiques d'une LDB suite à l'exposition prolongée à l'humidité sur chantier*. Disponible dans l'étude : *Isolants biosourcés : points de vigilance*- Agence Qualité Construction – Paris, 2016 – 64 pages.
- Illustration 8 : COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre – *Test comparatif du comportement au feu de deux complexes de toiture selon L'ISBN* – Disponible dans l'ouvrage *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. – Mens, Terre vivante, 2010 - 255 pages.
- Illustration 9 : Jocelyn ULRICH – *Répartition de la production des F-LDB à l'échelle nationale*. – D'après les informations de localisation issues des sites officiels des fabricants STEICO, EFFIREAL, ISONAT, PAVATEX et FIBRANATUR- [en ligne le 10/12/2018] –
- Illustration 10 : COLIN Antoine, THIVOLE-CAZAT Alain : *Répartition des catégories de bois selon leur diamètre présentes dans un arbre* – Disponible dans l'étude : *Disponibilités Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*. ADEME, Paris, 2016 – 91 pages.
- Illustration 11 : ULRICH Jocelyn – *Solution 1 : Isolation LDB avec support en béton* – Nov. 2018
- Illustration 12 : ULRICH Jocelyn – *Solution 2 : Isolation LDB + FDB avec support en béton* –
- Illustration 13 : ULRICH Jocelyn – *Solution 3 : Isolation LDB avec ossature bois* – Nov. 2018
- Illustration 14 : ULRICH Jocelyn – *Solution 4 : Isolation LDB + FDB avec ossature bois* – Nov. 2018

Table des graphiques :

- Graphique 1 : LUX Jérôme – *Variation de la conductivité thermique selon la densité de divers isolants.* - Disponible dans la Thèse : *Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes* – Université Sciences et Technologie, Bordeaux, 2009 - 172 pages.
- Graphique 2 : Sénova – *Déphasage et amortissement d’une paroi à faible et à forte inertie* – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://coproprietes.senova.fr/conseil-technique-juridique-reglementaire-financier-fiscal/ite-comment-choisir-son-materiaux-disolation-thermique-par-lexterieur/attachment/inertie-dephasage-isolant-thermique/>
- Graphique 3: Studio nature – *Comparaison du temps de déphasage de diverses parois types* – [en ligne le 10/12/2018] – Disponible sur : <https://www.studios-nature.com/isolation-loft-de-jardin-fibre-de-bois.htm>
- Graphique 4 : C&B Constructions et Bioressources - *Courbe de sorption-désorption d’un matériau hygroscopique.* – Disponible dans l’ouvrage : *Etat des lieux des connaissances actuelles sur le fonctionnement hygrothermique des matériaux biosourcés* – Maillot, 2012 – 67 pages.
- Graphique 5 : Aurélie Kaemmerlen – *Variation de la conductivité thermique du Thermisorel selon sa teneur en eau en pourcentage de la masse totale d’après le CSTB* – Disponible dans la Thèse : *Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment* – Université Henri Poincaré, Nancy, 2009 – 258 pages.
- Graphique 6 : TBC – *Estimation Répartition des parts de marché de l’isolation en France en 2017* – Disponible dans un extrait de l’étude : *Les isolants thermiques pour le bâtiment en 2017 en France.* – Toulouse, 2017 – 28 pages
- Graphique 7 : ULRICH Jocelyn - *Estimation Répartition des parts de marché de l’isolation biosourcée en France en 2017* – D’après les données issues de l’étude : *Projet de recherche TERRACREA* - Toulouse, Laboratoire de recherche de l’ENSAT (Ecole Nationale Supérieur d’Architecture de Toulouse), 2014 – 182 pages.
- Graphique 8 : HOBALLAH Mohamad Hussein, NDIAYE Amadou, MICHAUD Franck, IRLE Mark - *Relations entres domaines et sous-domaines de recherches* – Disponible dans l’étude : *Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge: Application to wood-based insulating materials* – Ecole supérieur du bois, Nantes – Elsevier – 105 pages.
- Graphique 9 : BASLER Ernst, WERNER Frank pour le compte de PAVATEX –. *Quantités et proportions du type d’énergie nécessaire à la production des panneaux PAVATEX (à gauche) et Evolution des émissions de CO2 par rapport au volume de production (à droite)* – Disponible dans l’étude : *Construire et habiter avec la nature* – Zurich – 28 pages
- Graphique 10 : PUILLAUDE Agnès – *prix moyens distributeurs HT de certaines solutions d’isolation en 2016 pour R = 5* – Disponible dans l’étude : *Le coût des matériaux biosourcés dans la construction : état de la connaissance 2016* – CEREMA - juin 2017 – 32 pages.
- Graphique 11 : COLIN Antoine, THIVOLE-CAZAT Alain – *Volume de disponibilité technico-économique du bois résineux total selon le rapport de L’ADEME en milliers de m³/an* – Disponible dans l’étude : *Disponibilités Forestière pour l’énergie et les matériaux à l’horizon 2035.* ADEME, Paris, 2016 – 91 pages.

- Graphique 12 : COLIN Antoine, THIVOLE-CAZAT Alain - *Volume de disponibilité nette supplémentaire du bois résineux total selon le rapport de L'ADEME en milliers de m³/an* – Disponible dans l'étude : *Disponibilités Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*. ADEME, Paris, 2016 – 91 pages.
- Graphique 13 : ULRICH Jocelyn – *Cumul du volume de disponibilité technico-économique des PCS et BIBE entrant dans la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an* – D'après les données issues de l'étude : *Disponibilités Forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, Paris, 2016 – 91 pages.
- Graphique 14 : ULRICH Jocelyn – *Cumul du volume de disponibilité nette supplémentaire des PCS et BIBE entrant dans la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an* – D'après les données issues de l'étude : *Disponibilités Forestière pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, Paris, 2016 – 91 pages.
- Graphique 15 : ULRICH Jocelyn – *Cumul des Disponibilités technico-économiques en BIBE et PCS résineux intégrés à la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an* – D'après les données issues de l'étude : *Disponibilités Forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, Paris, 2016 – 91 pages.
- Graphique 16 : ULRICH Jocelyn – *Cumul par régions des disponibilités nettes supplémentaires en BIBE et PCS résineux intégrés à la fabrication des F-LDB en milliers de m³/an* – D'après les données issues de l'étude : *Disponibilités Forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* – ADEME, Paris, 2016 – 91 pages.
- Graphique 17 : ULRICH Jocelyn – *Cumul du Potentiel global réchauffement des énergies de procédé et intégrées pour une UF de 1m³* – D'après les données issues de la DEP : *isolants en fibre de bois* – STEICO, 2016 – 11 pages
- Graphique 18 : COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre – *Bilan CO₂ des matériaux isolants en excluant le cas d'une revalorisation énergétique selon le Baubook* disponible dans l'ouvrage *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. - Mens, Terre vivante, 2010 - 255 pages.
- Graphique 19 : COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre – *Bilan de l'énergie grise prenant en compte seulement les énergies primaires non renouvelables de la phase de fabrication selon le Baubook* - disponible dans l'ouvrage *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. - Mens, Terre vivante, 2010 - 255 pages.
- Graphique 20 : ULRICH Jocelyn – *Mise en graphique du tableau 14 : Ecopoints UPB de matériaux isolants pour une UF de 1 kg* – D'après les données issues du tableau 14 – Nov. 2018
- Graphique 21 : ULRICH Jocelyn – *Mise en graphique du tableau 16 : Ecopoints UPB de matériaux isolants pour une UF de R = 5* – D'après les données issues du tableau 16 – Nov. 2018
- Graphique 22 : ULRICH Jocelyn – *Mise en graphique de l'évaluation des Ecopoints UPB total des systèmes constructifs des 4 solutions* – D'après les données issues du tableau 23 – Nov. 2018

Table des tableaux :

- Tableau 1 : COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre – *Caractéristiques générales des LDB d’après le CSTB* – Disponible dans l’ouvrage : *L’isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. - Terre vivante, Mens, 2010 - 255 pages.
- Tableau 2 : COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre – *Caractéristiques générales des FDB d’après le CSTB*, Disponible dans l’ouvrage *L’isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*. - Terre vivante, Mens, 2010 - 255 pages.
- Tableau 3 : PassivAct - *Diffusivité thermique des matériaux de construction* - [en ligne le 10/12/2018] - Disponible sur : <https://passivact.fr/Concepts/files/QualiteThermique-ComparaisonsMateriaux.html>
- Tableau 4 : PassivAct - *Effusivité thermique des matériaux de construction*- [en ligne le 10/12/2018] - Disponible sur : <https://passivact.fr/Concepts/files/QualiteThermique-ComparaisonsMateriaux.html>
- Tableau 5 : HOBALLAH Mohamad Hussein, NDIAYE Amadou, MICHAUD Franck, IRLE Mark – *Axe de priorité et difficulté d’appréhension des domaines de recherche* – Disponible dans l’étude : *Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge: Application to wood-based insulating materials* – Ecole supérieure du bois, Nantes – Elsevier - 105 p.
- Tableau 6 : STEICO – *Description des phases du cycle ACV disponible dans la DEP : isolants en fibres de bois* – Institut Bazuen und Umwelt – 2016 – 10 pages
- Tableau 7 : ULRICH Jocelyn – *Cumul des énergies primaires renouvelables et non renouvelables pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$* – D’après les données issues des FDES ISONAT Flex 40, ISONAT Multisol 140 et ISONAT Duoporotect.
- Tableau 8 : ULRICH Jocelyn - *Cumul des énergies primaires renouvelables pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$* D’après les données issues des FDES ISONAT Flex 40, ISONAT Multisol 140 et ISONAT Duoporotect.
- Tableau 9 : ULRICH Jocelyn - *Pourcentage d’intégration des énergies primaires renouvelables pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$* - D’après les données issues des FDES ISONAT Flex 40, ISONAT Multisol 140 et ISONAT Duoporotect.
- Tableau 10 : ULRICH Jocelyn - *Cumul du potentiel global de réchauffement pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$* - D’après les données issues des FDES ISONAT Flex 40, ISONAT Multisol 140 et ISONAT Duoporotect.
- Tableau 11 : ULRICH Jocelyn - *Cumul de la pollution de l’eau pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$* - D’après les données issues des FDES ISONAT Flex 40, ISONAT Multisol 140 et ISONAT Duoporotect.
- Tableau 12 : ULRICH Jocelyn - *Cumul de la pollution de l’air pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$* - D’après les données issues des FDES ISONAT Flex 40, ISONAT Multisol 140 et ISONAT Duoporotect.
- Tableau 13 : *Association KBOB : Points UPB des étapes de fabrication et d’élimination de divers matériaux isolants* – Base de donnée KBOB – 2016.
- Tableau 14 : ULRICH Jocelyn - *Conversion des données techniques de matériaux d’après les fabricants pour obtenir une UF de $R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$* – Données issues des fiches techniques des fabricants des matériaux concernés – Nov. 2018

- Tableau 15 : ULRICH Jocelyn - Conversion d l'UF de 1 kg pour une UF de $R = 5 \text{ m}^2.K/W$ des données de la base KBOB appliquée aux matériaux du tableau 15 - Données issues de la base KBOB et du tableau 15 – Nov. 2018
- Tableau 16 : ULRICH Jocelyn – *Epaisseurs de la solution 1 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016.* – D'après les données issues du tableau 15 – Nov 2018
- Tableau 17 : ULRICH Jocelyn – *Epaisseurs de la solution 2 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016.* – D'après les données issues du tableau 15– Nov. 2018
- Tableau 18 : ULRICH Jocelyn – *Epaisseurs de la solution 3 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016* – D'après les données issues du tableau 15 – Nov. 2018
- Tableau 29 : ULRICH Jocelyn – *Epaisseurs de la solution 4 pour obtenir une valeur U proche de 0,20 à l'aide d'une simulation avec l'outil PHPP 2016* - D'après les données issues du tableau 15 – Nov.2018
- Tableau 20 : ULRICH Jocelyn – *Evaluation des Ecopoints UPB des systèmes constructifs des 4 solutions – D'après les données issues de la base KBOB* – Nov. 2018
- Tableau 21 : ULRICH Jocelyn – *Evaluation des Ecopoints UPB de l'isolation des systèmes constructifs des 4 solutions* - D'après les données issues de la base KBOB – Nov. 2018
- Tableau 22 : ULRICH Jocelyn – *Evaluation des Ecopoints UPB total des systèmes constructifs des 4 solutions* - D'après les données issues des tableaux 20 et 21 – Nov. 2018

Table des annexes :

- Annexe 1 : Entretien réalisé avec l'artisan poseur Henry PINCE
- Annexe 2 : Entretien réalisé avec l'artisan poseur Sylvain BOULE
- Annexe 3 : Entretien réalisé avec l'architecte Estelle MIGNOT
- Annexe 4 : Entretien réalisé avec l'architecte Henry PIGUILLEM
- Annexe 5 : Entretien réalisé avec le représentant commercial de STEICO SA – Franck JOSCHT
- Annexe 6 : Entretien réalisé avec le représentant commercial de ISONAT SA– Jérôme KENNELLY
- Annexe 7 : *FDES du produit Flex 40* – ISONAT, Malby, 2016 – 17 pages.
- Annexe 8 : *FDES du produit Multisol 140* – ISONAT, Malby, 2016 – 17 pages.
- Annexe 9 : *FDES du produit Duoprotect* – ISONAT, Malby, 2016 – 17 pages.
- Annexe 10 : *DEP Panneaux isolants en fibres de bois* – PAVATEX SA, Institut Bauen und Umwelt, Fribourg, 2010 – 24 pages.
- Annexe 11 : *DEP Isolants en fibres de bois* – STEICO SA, Institut Bauen und Umwelt, Berlin, 2016 – 10 pages.
- Annexe 12 : Base KBOB 2016 – KBOB p.a, OFCL (Office Fédéral des Constructions et de la Logistique), Berne, 2016 – Fichier XLS