

Zone réservée à l'instructeur ADEME				
Diffusion	Confidentialité	Stratégique/sensible	Valorisation à prévoir	Date de revue d'obsolescence
<input type="checkbox"/> Interne	<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Oui	MM/AAAA
<input checked="" type="checkbox"/> Externe	Date fin : MM/AAAA	<input checked="" type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Non	
Nom du responsable UG		Validation de la qualification		

Bloc de texte à enlever avant la conversion en pdf, puis à replacer sur le word

# VALOMATBIO - ETUDE DE LA VALORISATION DES ISOLANTS BIOSOURCES EN FIN DE VIE

Rapport 2 : Essais en laboratoires en vue  
de ressortir les scénarios prospectifs pour  
les matériaux cibles

Synthèse

Décembre  
2022

## REMERCIEMENTS

Christelle RABBAT (IMT Atlantique)  
Sary AWAD (IMT Atlantique)  
Audrey VILLOT (IMT Atlantique)  
Yves ANDRES (IMT Atlantique)  
Delphine ROLLET (Inddigo)  
Coralie GARCIA (CF2B)  
Nathalie TORNAY (LRA, ENSA Toulouse)  
Catherine AVENTIN (LRA, ENSA Toulouse)  
Virginie DUFOUR (ESTEANA)  
Frédéric ROSSI (ESTEANA)  
Luc FLOISSAC (Eco-études)

## CITATION DE CE RAPPORT

LEONARDON Philippe, ADEME, RABBAT Christelle, AWAD Sary, VILLOT Audrey, ANDRES Yves, IMT Atlantique, 2022. **Etude de la valorisation des isolants biosourcés en fin de vie.** 16 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

**Ce document est diffusé par l'ADEME**

**ADEME**

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1904C0004

Étude réalisée par INDDIGO, IMT Atlantique, Eco-études, Esteara, LRA de l'ENSA de Toulouse et la CF2B pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : INDDIGO

Appel à projet de recherche : APR BAT RESP 2017

Coordination technique - ADEME : LEONARDON Philippe

Direction Ville et Territoire Durable (DVTD) / Service Bâtiment (SB)

# SOMMAIRE

RESUME .....	5
ABSTRACT .....	6
<b>1. INTRODUCTION ET METHODOLOGIE .....</b>	<b>7</b>
<b>2. SELECTION DES CINQ MATERIAUX BIOSOURCES PROMETTEURS.....</b>	<b>8</b>
2.1. Matériaux écartés.....	8
2.2. Sélection des matériaux cibles.....	8
<b>3. CARACTERISATION ET ORIENTATION VERS LES VOIES APPROPRIEES.....</b>	<b>11</b>
3.1. Caractérisation en laboratoire des matériaux cibles .....	11
3.2. Sélection des voies de valorisation appropriées .....	11
<b>4. VOIES DE CONVERSION THERMOCHIMIQUE : ESSAIS EN LABORATOIRE .....</b>	<b>12</b>
4.1. Prétraitement par densification.....	12
4.2. Pyrolyse .....	12
4.2.1. Réacteur et caractérisation des produits obtenus.....	12
4.2.2. Bilan de masse et d'énergie .....	13
4.2.3. Analyses des produits de pyrolyse .....	14
4.2.4. Raffinage de la bio-huile issus des fibres de chanvre.....	14
4.3. Pyro-gazéification .....	15
4.3.1. Pyro-gazéification totale à la vapeur d'eau.....	15
4.3.2. Production de charbon actifs à partir des textiles recyclés et leur utilisation dans le traitement d'eau .....	16
4.4. Combustion en Chaudière.....	17
4.4.1. Performance environnementale .....	17
4.4.2. Performance énergétique .....	18
<b>5. CONCLUSION.....</b>	<b>19</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>20</b>
<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>22</b>
<b>ANNEXE 1 : COMPOSITION DES MATERIAUX ISOLANTS BIOSOURCES CIBLES .....</b>	<b>22</b>
<b>ANNEXE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ISOLANTS BIOSOURCES CIBLES ...</b>	<b>23</b>
<b>ANNEXE 3 : PYROLYSE : CARACTERISATION DES FRACTIONS LOURDES ET LEGERES</b>	<b>24</b>
<b>ANNEXE 4 : CARACTERISATION DU CHARBON ACTIF.....</b>	<b>25</b>
<b>ANNEXE 5 : COMBUSTION DES GRANULES WR, HF ET WF.....</b>	<b>26</b>
<b>INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES .....</b>	<b>27</b>
<b>SIGLES ET ACRONYMES .....</b>	<b>28</b>

## RESUME

Les préoccupations liées au changement climatique ont poussé à la décarbonisation du secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en France. Dans le bâtiment, l'isolation thermique joue un rôle important dans la minimisation de la consommation d'énergie opérationnelle. Actuellement, l'isolation est réalisée à l'aide de matériaux dérivés de minéraux et de combustibles fossiles. C'est pourquoi les matériaux biosourcés ont suscité un intérêt croissant sur les marchés européen et français comme isolants propres et efficaces. Actuellement, ce secteur constitue 10 % du marché de l'isolation. En raison des réglementations thermiques et environnementales actuelles (RE 2020), une utilisation massive de ces matériaux biosourcés est envisagée dans le secteur du bâtiment et leur part de marché devrait doubler d'ici 2025.

Cette incitation à l'utilisation de ces matériaux va entraîner une augmentation des volumes de déchets à traiter en fin de vie. Dans la littérature, les scénarios de valorisation sont quasiment inexistants et le scénario considéré par défaut dans les analyses de cycle de vie et les fiches de déclarations environnementales et sanitaires est la mise en décharge. À l'heure actuelle, la réutilisation et le recyclage de ces matériaux émergents étant coûteux et difficiles, ce travail a été envisagé dans le cadre du projet VALO-MAT-BIO et a visé l'exploration et l'évaluation de la valorisation énergétique des matériaux biosourcés en fin de vie.

En conséquence, notre travail commencera par la sélection de cinq matériaux biosourcés les plus prometteurs et représentatifs du marché français pour une étude plus approfondie. Suite à cette sélection, les propriétés physico-chimiques et la composition des matériaux ciblés seront déterminées. Ensuite, les résultats des essais en laboratoires de valorisation énergétique par voies de conversion thermo-chimiques, notamment de pyrolyse, pyro-gazéification et combustion, seront présentés et discutés. Enfin, les résultats seront comparés en vue de ressortir la ou les voie(s) de valorisation les plus pertinentes pour chaque matériau ciblé.

Ce travail servira de base pour la suite des études. Les scénarios seront repris pour modéliser l'analyse de cycle de vie et ensuite étudier l'impact à l'échelle d'un bâtiment.

## ABSTRACT

Concerns about climate change have led to the decarbonization of the building sector, the largest energy consumer in France. In the building sector, thermal insulation plays an important role in minimizing operational energy consumption. Currently, insulation is made with materials derived from minerals and fossil fuels. For this reason, biomass-based materials have attracted growing interest in the European and French markets as clean and efficient insulation materials. Currently, this sector constitutes 10% of the insulation market. Due to the current thermal and environmental regulations (RE 2020), massive use of these biomass-based insulation materials is envisaged in the building sector and their market share is expected to double by 2025.

This incentive to use these materials will lead to an increase in the volume of waste to be treated at the end of its life. In the literature, recovery scenarios are almost non-existent and the default scenario considered in life cycle assessments and environmental product declarations is landfilling. Currently, the reuse and recycling of these emerging materials is costly and difficult, so this work was considered within the framework of the VALO-MAT-BIO project and aimed at exploring and evaluating the energy recovery of biomass-based insulation materials at the end of their life.

Consequently, our work will start with the selection of five most promising and representative biomass-based insulation materials of the French market for a more in-depth study. Following this selection, the physicochemical properties and composition of the targeted materials will be determined. Then, the results of laboratory tests of energy recovery through thermochemical conversion routes, including pyrolysis, pyro-gasification and combustion, will be presented and discussed. Finally, the results will be compared in order to identify the most relevant recovery route(s) for each targeted material.

This work will serve as a basis for further studies. The scenarios will be used to model the life cycle assessments and then to study the impact at the scale of a building.

# 1. Introduction et méthodologie

L'Europe s'oriente aujourd'hui vers la construction de bâtiments durables par la mise en œuvre de nouveaux Matériaux d'Isolation Biosourcés (MIB) comme alternatives aux matériaux minéraux et synthétiques. En 2015, 230 000 tonnes de résidus de biomasse produits en France ont été valorisés dans le secteur du bâtiment, représentant 8% du marché de l'isolation [1]. Entre 2016 et 2020, le marché des MIB a connu une croissance exponentielle, notamment dans le cadre de la réglementation environnementale RE2020. Au cours de ces cinq dernières années, 130 millions de m<sup>2</sup> de produits ont été mis en œuvre, dont 27 millions de m<sup>2</sup> (84 000 maisons résidentielles entièrement isolées) en 2020, ce qui correspond à une augmentation du volume de 87 % [2]. Actuellement, ce secteur constitue 10% du marché de l'isolation et cette part de marché devrait atteindre 20% en 2025 [3].

Malgré leurs avantages environnementaux pendant les phases de fabrication et d'utilisation, leur fin de vie n'est pas encore abordée dans la littérature. Actuellement, la mise en décharge est la stratégie communément adoptée pour la gestion de ces déchets, ce qui entraîne de graves problèmes environnementaux. Les premiers dépôts, comprenant entre 5 000 et 15 000 tonnes, devraient apparaître entre 2025 et 2030 [4,5]. A partir de cette date, la production de déchets de MIB augmentera de manière exponentielle pour atteindre 150 000 tonnes en 2050, nécessitant d'anticiper leur devenir [6].

Comme la réutilisation et le recyclage de ces nouveaux produits rencontrent des obstacles techniques, économiques et environnementaux [7–9], cette étude, dont la méthodologie est illustrée dans la Figure 1, a été effectuée afin d'explorer et d'évaluer plusieurs voies de valorisation énergétique des déchets, notamment la pyrolyse, la pyro-gazéification et la combustion, sur cinq familles de MIB représentatives du marché français. Cette étude vise à produire des produits à valeur ajoutée et à associer chaque matériau à sa ou ses voies de valorisation les plus pertinentes.

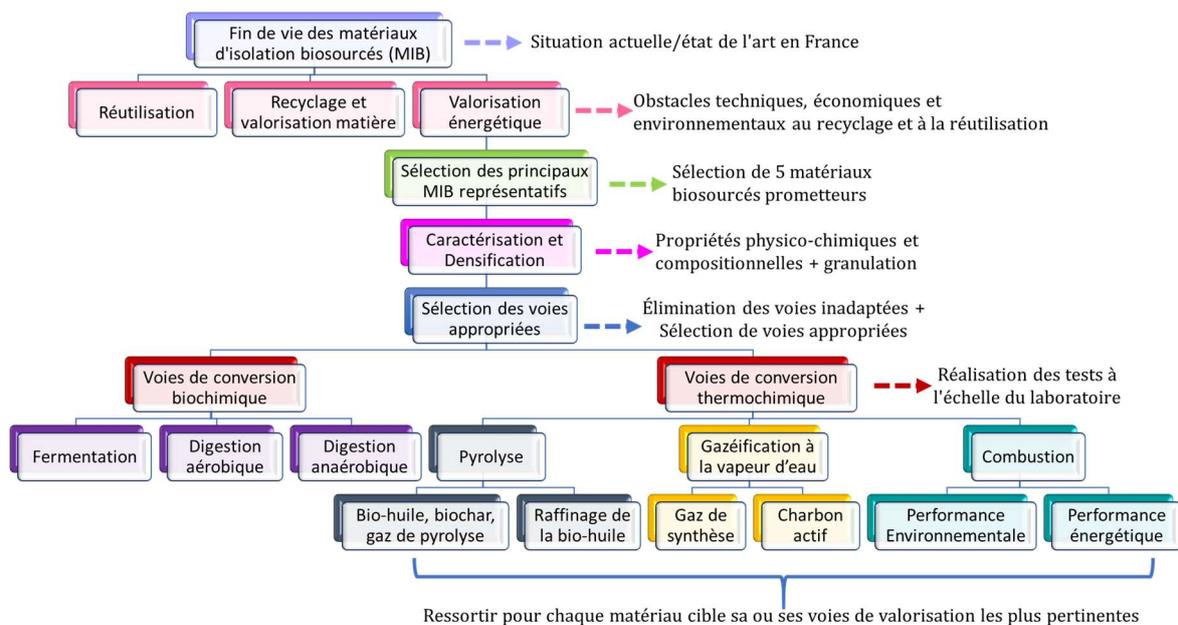


Figure 1 : La méthodologie adoptée dans cette étude (MIB : matériaux d'isolation biosourcés)

## 2. Sélection des cinq matériaux biosourcés prometteurs

---

### 2.1. Matériaux écartés

Dans un premier temps, une étude de gisement a été réalisée sur les filières de matériaux biosourcés d'isolation les plus matures et les plus développées en France, ainsi qu'une étude sur leurs scénarios de valorisation actuels et prospectifs en fin de vie [11]. Tout d'abord, un tri préliminaire a été mené pour écarter les matériaux biosourcés non favorables et accepter ceux qui sont potentiellement porteurs. Les matériaux écartés incluent :

1. La paille : filière ne présentant aucun défi souligné dans les fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES) en termes de gestion de fin de vie. Les bottes de paille ne comportent pas d'additifs et peuvent donc être orientées vers une valorisation agricole et retournées au sol après leur retrait du bâtiment. De plus, la filière des panneaux de paille de blé est encore immature avec un volume de production très faible (< 400 tonnes/an en 2012 [1]) et il n'existe pas de statistiques fiables ni de données de référence livrées [10]. Par ailleurs, pour les panneaux isolants en paille de riz (92% paille de riz et 8% de liant polyester), un seul fabricant « FBT isolation » existe. Il s'agit d'un marché actuellement émergent (> 4,000 tonnes en 2020) et potentiellement intéressants à valoriser en fin de vie en raison de leur haute teneur en silice. Néanmoins, leur marché futur est incertain ; ces produits ne seront pas pris en considération dans l'étape suivante.
2. La balle de riz : filière nouvelle encore en développement. Aucun taux de croissance annuel n'est envisagé ni l'évolution de la production en 2030 et 2050. A l'heure actuelle, il n'existe pas de FDES pour ces matériaux et leur composition est encore inconnue [1]. L'avenir de la balle de riz en France étant incertain, ce matériau a été éliminé dans la suite de l'étude.
3. La laine de mouton : filière en disparition en raison des difficultés liées à la faible valeur du produit et au processus de lavage qui est principalement effectué en Chine et en Espagne. Ce secteur est aujourd'hui marginal en isolation. A l'horizon de 2030 et 2050, la disponibilité de la laine pour la construction plafonne à environ 5 000 tonnes [10]. Due au ralentissement du marché, ces produits n'ont pas été pris en compte pour un examen plus approfondi.
4. Les fibres de lin : principalement utilisées pour la production de produits à haute valeur ajoutée tels que les vêtements et les tissus de haute qualité. Dans le secteur du bâtiment, la part des panneaux en fibres de lin est extrêmement faible (< 2000 tonnes) et dédiée à l'isolation des cloisons et des toitures intérieures [10]. Le taux de croissance de l'industrie textile du lin est presque nul dans les années à venir. Par conséquent, aucune augmentation notable de l'intégration des matériaux en lin dans le bâtiment n'est attendue. Cette filière restera au même niveau qu'aujourd'hui jusqu'en 2050, justifiant son écartement [10].

### 2.2. Sélection des matériaux cibles

Suite à ce premier criblage, un diagramme de Kiviat a été adopté pour la représentation des quatre critères principaux définis et évalués pour tous les matériaux biosourcés retenus, facilitant ainsi leur comparaison (Figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le marché de ces produits devrait connaître une croissance importante jusqu'en 2050. Ces critères comprennent leurs volumes actuels (commercialisés en 2020) et futurs (projection en 2050), leurs volumes de déchets générés à l'horizon 2050, leurs compositions en termes d'additifs et leurs potentiels contributions au réchauffement climatique en fin de vie. Toutes les valeurs ont été normalisées à des valeurs comprises entre 0 et 1.

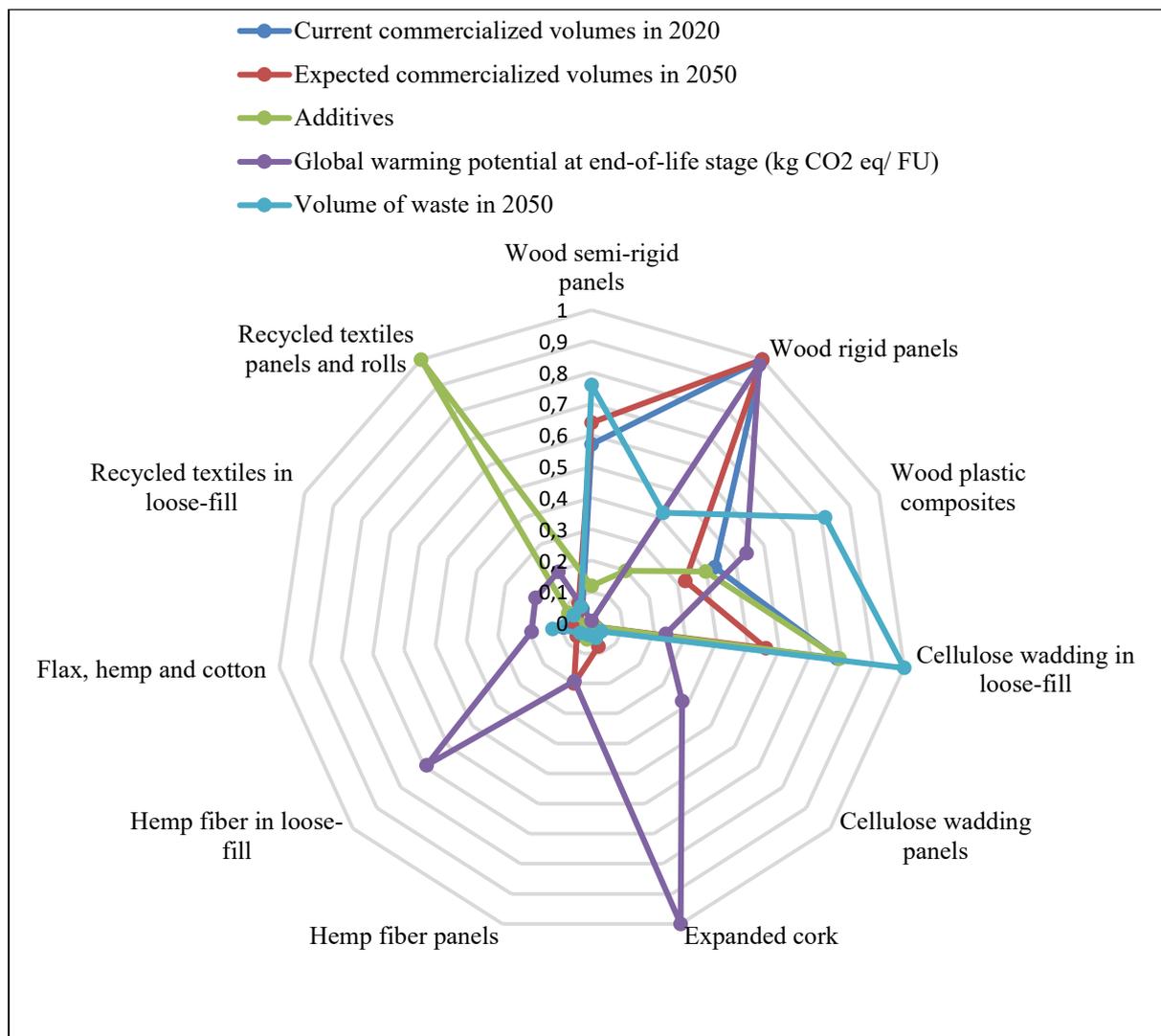


Figure 2 : Comparaison des matériaux isolants biosourcés retenus par un diagramme de Kiviat

Après l'analyse du diagramme, on remarque que :

1. La ouate de cellulose en vrac : + 5% de croissance par an en volume jusqu'en 2030 [5]. Le tonnage est estimé à environ 200 000 tonnes d'ici 2050 en raison du gisement important de papiers et cartons [10]. De plus, ce matériau est bon marché (73 000 tonnes/an en 2020 [5]), et occupe 40 % des parts de marché des isolants biosourcés en France. À l'horizon 2050, la ouate de cellulose en vrac est le déchet biosourcé prédominant (plus de 80 000 tonnes). Malgré une contribution moyenne par unité fonctionnelle au réchauffement climatique, le tonnage important de ces déchets amplifiera la libération de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. De plus, ce matériau contient une quantité élevée d'additifs (10% en masse), donc son traitement est obligatoire.
2. Les isolants rigides et semi-rigides en fibre de bois ont actuellement une forte part de marché de 40% des isolants biosourcés [1]. En 2020, le volume commercialisé en France de panneaux rigides en bois est de 93 000 tonnes/an et celui des panneaux souples est de 53 000 tonnes/an [10]. Un développement important de ces matériaux est attendu dans les années à venir. Cependant, le recyclage et la valorisation énergétique des panneaux rigides sont trop étudiés dans la littérature, les panneaux durs ont été écartés alors que les panneaux souples sont retenus. En outre, les panneaux souples incorporent plus de 10 % en poids de liants plastiques et une proportion d'additifs (retardateurs de flamme) considérable de l'ordre de 5% en masse. Leur volume de déchets en 2050 est important. Par conséquent, leur fin de vie doit être anticipée.
3. Textiles recyclés en panneaux et/ou rouleaux : la quantité de panneaux textiles recyclés est susceptible d'augmenter considérablement à l'avenir en raison des millions de vêtements vendus à cause de la

mode. La réutilisation des textiles comme produits d'isolation est donc un véritable enjeu environnemental. Par ailleurs, cette filière intègre un ensemble d'acteurs (producteurs, consommateurs et pouvoirs publics) qui pourrait sans doute permettre d'augmenter significativement le taux de recyclage des matériaux en coton dont la disponibilité va croître dans les années à venir. De plus, " Le Relais " a installé une nouvelle ligne de production pour doubler la quantité de panneaux/rouleaux isolant. La disponibilité du coton recyclé pour la construction a été arbitrairement estimée à 20 000 tonnes en 2030 et 50 000 tonnes en 2050 [10]. Le tonnage devrait atteindre environ 25 000 tonnes en 2050 (dans l'hypothèse de 50 % de vrac et 50 % de panneaux). L'augmentation de la production entraînera une forte baisse des prix de commercialisation. Cependant, ces produits incorporant le pourcentage le plus élevé d'additifs (12,6%). Malgré une faible contribution au réchauffement climatique et un faible tonnage de déchets en 2050, la valorisation de ces matériaux en fin de vie n'est pas vraiment développée (incinération et mise en décharge). Pour ces raisons, l'accent doit être mis sur la gestion de ces matériaux en fin de vie.

4. Les panneaux mixtes en fibres de lin, chanvre et coton : Les panneaux ont un tonnage actuel important de 8 500 tonnes et sont attendu à doubler en 2050. Cependant, ces produits contiennent la plus faible quantité d'additifs (0,2%) en raison des propriétés ignifuges et biocides du lin. Malgré leur faible contribution au réchauffement climatique et leur faible tonnage de déchets en 2050, ces matériaux ont été sélectionnés comme étant le seul matériau commercialisé à base de 3 fibres biosourcées avec un liant plastique. La gestion de ces fibres mixtes en fin de vie n'est pas encore abordée dans la littérature, d'où l'intérêt donc de se concentrer sur leur valorisation.
5. Panneaux de chanvre : Le secteur du chanvre est considéré comme l'un des secteurs de matériaux biosourcés les plus matures. La culture du chanvre dans les chanvrières est rapide (90 à 120 jours), la plante consomme très peu d'eau et ne nécessite pas de pesticides pour sa croissance. Malgré son potentiel de développement limité à l'heure actuelle, plusieurs fabricants/acteurs s'y intéressent. L'offre locale de matériaux à base de chanvre est satisfaite sur le territoire français. Cependant, la demande reste un obstacle majeur en raison du coût élevé de ces produits par rapport aux isolants conventionnels. Dans les années à venir, la filière de laine isolante prévoit devenir suffisamment compétitive en termes de prix et les volumes pourraient croître rapidement. Malgré un faible volume actuel, ces panneaux expérimenteront une croissance dans le secteur du bâtiment [10]. Ils sont composés de 10 % en masse de liant synthétique et d'une faible quantité d'additifs (0,2 % en poids) et contribuent faiblement au réchauffement climatique après leur rejet dans les décharges. Il est donc important d'anticiper de nouvelles voies de valorisation de ces matériaux en fin de vie.
6. Les panneaux de liège expansé : contribution la plus marquante au réchauffement climatique. Mais le volume actuel n'est que 1500 tonnes/an qui sont majoritairement importés. Le scénario prospectif consiste à diminuer l'importation et à relancer cette filière en replantant ou en poursuivant l'entretien des zones de culture abandonnées ou mal gérées. Dans le meilleur des cas, le liège d'origine française utilisé comme matériau de construction pourrait atteindre 25 000 tonnes/an à long terme d'ici 2050 [10].
7. Les textiles recyclés en vrac : production actuelle minime. Elle est susceptible d'augmenter significativement dans l'avenir [10]. Pour " Buitex Industries ", la production d'isolants à base de coton en vrac est devenue une activité stratégique que l'entreprise développe en priorité à partir de 2018. Quant à RMT Isolation, située à Barcelone, commercialise de la laine de coton en vrac sur le marché français et européen. De plus, " Isocomble ", une industrie située en Catalogne, prévoit d'implanter prochainement une usine de production en France afin de proposer une gamme de flocons à souffler.

Suite à cette étude, les cinq matériaux les plus prometteurs, représentatifs des filières de matériaux biosourcés d'isolation les plus matures et les plus développées en France ont été retenus pour une étude plus approfondie. Ces matériaux provenant d'une diversité de ressources locales de biomasse sont la ouate de cellulose en vrac (CW), les panneaux semi-rigides en fibres de bois (WF), les panneaux de textiles recyclés (RT), les panneaux de fibres de chanvre (HF) et les panneaux mixtes composés de fibres de lin, de chanvre et de coton (MF). Leur composition, indiquée dans les Avis techniques, est présentée dans l'Annexe 1.

## 3. Caractérisation et orientation vers les voies appropriées

### 3.1. Caractérisation en laboratoire des matériaux cibles

Les matériaux ciblés ont été caractérisés en laboratoire pour la détermination de leurs propriétés physico-chimiques et de leur composition. La méthodologie appliquée a consisté à broyer la matière première en poudre dans un broyeur à billes (Retsch MM400), sécher pendant 24 heures dans une étuve réglée à 105 °C pour déterminer leur teneur en humidité [12]. Après séchage, le taux de cendres a été déterminé après combustion à l'air des matériaux dans un four à moufle réglé à 550 °C conformément à la norme EN ISO 18122 [13]. Les proportions en carbone, hydrogène, soufre, azote et oxygène présents dans les échantillons biosourcés ont été mesurés à l'aide d'un analyseur élémentaire (Analyseur CHNS/O, Flash EA1112 Thermo Finnigan) [14]. Le contenu énergétique ou pouvoir calorifique supérieur (PCS) du matériau a été évalué dans une bombe calorimétrique (Calorimètre Par 6200) en présence de 30 bars d'oxygène comprimé [15]. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) a été ensuite calculé et représente la quantité de chaleur, par unité de masse, théoriquement dégagée dans une combustion parfaite.

Dans un second temps, les matériaux biosourcés broyés et séchés ont été caractérisés par analyse thermogravimétrique (ATG) dans une atmosphère inerte contrôlée pour déterminer leur plage de dégradation [16] ainsi que leur teneur en matières volatiles (MV) et carbone fixe selon la norme EN ISO 18123 [17]. Cette analyse a été effectuée dans un Analyseur thermogravimétrique SETSYS Evolution 1750. La composition en cellulose, hémicellulose et lignine a été déterminée par fractionnement biochimique suivant la norme FD U44-162 [17]. Les résultats de toutes ces analyses mentionnées sont présentés dans l'Annexe 2.

Ainsi, ces produits présentent des compositions assez hétérogènes en termes de teneur en humidité, de teneur en cendres, de PCI et de leurs proportions en cellulose, hémicellulose et lignine. Leur température maximale de dégradation ne dépasse pas les 550 °C.

### 3.2. Sélection des voies de valorisation appropriées

La présence d'une grande quantité d'hémicellulose et de cellulose favorise la conversion par des procédés biochimiques. Néanmoins, ces processus sont très sensibles à la présence d'additifs et à la teneur élevée en lignine de la matière première. La présence d'additifs tels que l'acide borique et les composés inorganiques azotés freine les activités biologiques des microorganismes anaérobies [65], comme étant toxiques et inhibiteurs ; réduisant ainsi la production de méthane pendant la digestion anaérobie. De plus, ces additifs inhibent certaines actions spécifiques des enzymes pendant la fermentation [66]. De son côté, la lignine agit comme une barrière qui empêche la bioconversion de l'hémicellulose et cellulose. En fait, ce constituant est à peine digéré par les microorganismes et les enzymes. Par conséquent, un matériau présentant une teneur importante en lignine (> 20 %) n'est pas recommandé pour la digestion et la fermentation anaérobies. En outre, la lignine est responsable de la génération de composés polyphénoliques, inhibant les voies de fermentation en aval. Pour produire des biocarburants (bioéthanol, biogaz) et des produits chimiques à partir de processus biochimiques, la biomasse lignocellulosique doit avoir une teneur élevée en holocellulose (> 65 %), une faible teneur en lignine (< 10 %), une faible teneur en cendres (< 1 %) et une teneur élevée en azote (> 0,2 %) [64]. Ces conditions n'étant pas remplies, les technologies de conversion biochimiques ont été écartées pour les MIB.

D'autre part, la valorisation énergétique via des procédés de conversion thermochimique est privilégiée pour les matériaux secs et ligneux. En fait, ces procédés présentent l'avantage d'être flexibles et capables de traiter rapidement diverses matières premières de biomasse tout en les convertissant en chaleur/électricité et en vecteurs énergétiques précieux tels que des produits chimiques (alcools, etc.) ainsi que des biocarburants solides (biochar), gazeux (syngas, H<sub>2</sub>) ou liquides (bio-huile). Par exemple, durant la pyrolyse à haute température d'un matériau ligneux, la lignine est dépolymérisée en oligomères et composés phénoliques (bio-huile) et favorise la production de biochar (aromatiques). Les MIB contenant des adjuvants (liants plastiques et additifs), secs et ligneux avec un PCI modéré à élevé (13.5-18.5 MJ/kg), la pyrolyse, la pyro-gazéification et la combustion, ont été suggérées pour être testées sur les matériaux ciblés.

En conclusion, les cinq isolants biosourcés les plus prometteurs et représentatifs du marché français ont été retenus pour une étude plus approfondie. Après caractérisation au laboratoire, ses matériaux cibles présentent des caractéristiques très hétérogènes. Etant ligneux, adjuvantés et secs, les procédés de conversion thermochimique ont été privilégiés. Des essais de pyrolyse, pyro-gazéification et combustion seront réalisés sur les matériaux sélectionnés.

## 4. Voies de conversion thermochimique : Essais en laboratoire

La pyrolyse, la gazéification et la combustion sont trois voies thermochimiques prometteuses pour transformer les matières premières issues de biomasse lignocellulosique en combustibles de valeur et/ou chaleur. Etant des technologies respectueuses de l'environnement et efficace pour le traitement de déchets avec une performance technique et environnementale élevée, la pyrolyse convertie la matière première en vecteurs énergétiques tels que le biochar, le gaz de pyrolyse et les goudrons (bio-huile, wax, eau). La gazéification produit principalement du gaz de synthèse ; alors que la combustion génère essentiellement de la chaleur.

### 4.1. Prétraitement par densification

En raison de leur faible densité massique et de leur état fibreux, la densification des MIB ciblés a été réalisée manuellement à l'aide d'une presse hydraulique pour la production d'un petit volume de granulés dédiés à la pyrolyse et pyro-gazéification; et automatiquement à l'aide d'une presse industrielle pour la production d'un grand volume de granulés pour la combustion.

### 4.2. Pyrolyse

#### 4.2.1. Réacteur et caractérisation des produits obtenus

Les expériences de pyrolyse lente des 5 matériaux biosourcés ont été réalisées dans un réacteur semi-rotatif en Inconel d'un volume de 4,5 L et placé à l'intérieur d'un four électrique (Figure 3) [19]. La température maximale de dégradation obtenue par ATG a été fixée pour effectuer les tests de pyrolyse. Pour cela, le réacteur est chauffé à 10 °C/min jusqu'à 550 °C maintenue pour 2 heures dans une atmosphère inerte (débit N<sub>2</sub> = 750 ml/min).

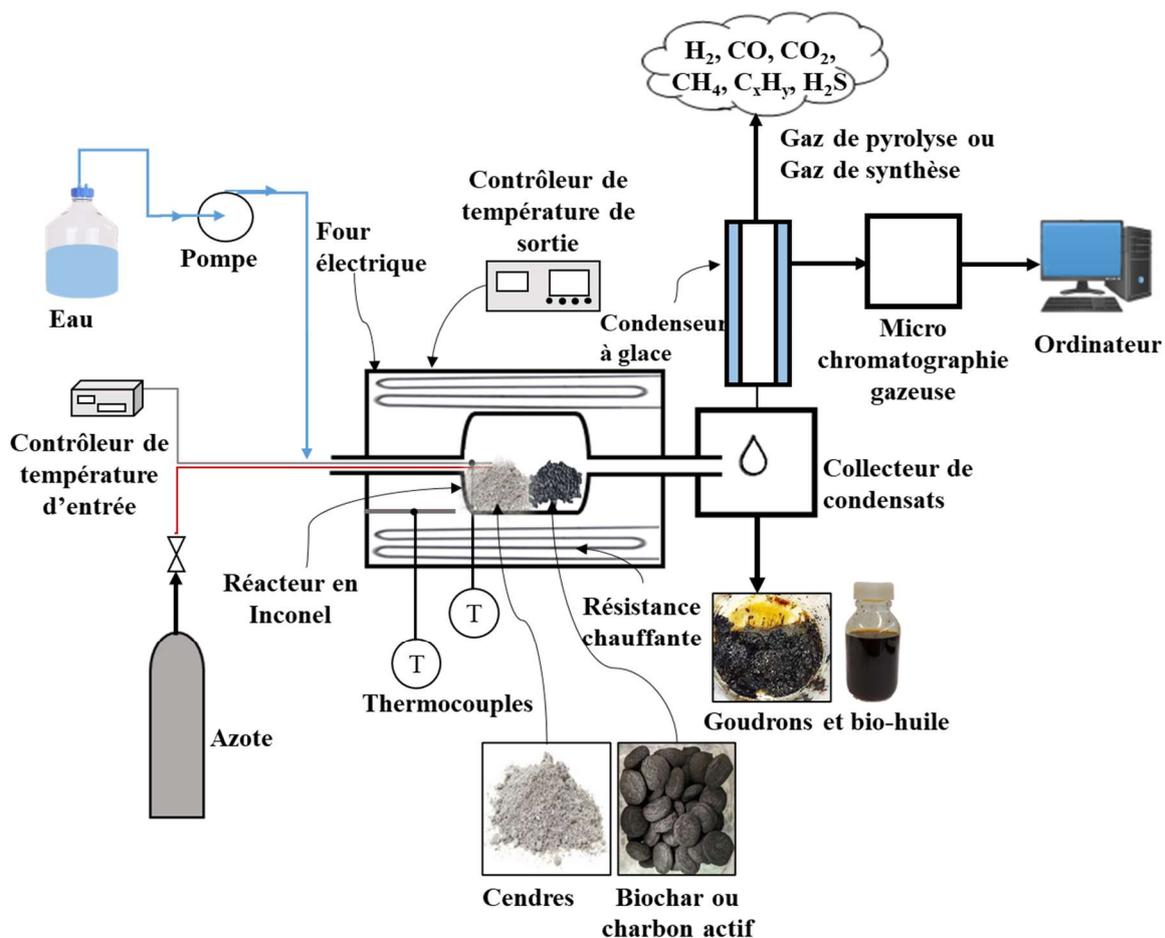


Figure 3: Configuration du réacteur utilisé pour la pyrolyse et la gazéification des différents MIB ciblés

La dégradation des MIB à haute température génère des gaz condensables et non-condensables qui passent dans un piège froid. A ce stade, les composés condensables sont liquéfiés et collectés dans le bac à huile alors que les non condensables

sont analysés par chromatographie en phase gazeuse (Micro GC Fusion) avant d'être émis à l'atmosphère. Cet appareil permet un suivi en temps réel des gaz majeurs (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) ainsi que certains gaz mineurs (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, etc.) avant leur évacuation. A la fin de l'expérience, le réacteur est refroidi sous azote et les produits récupérés et analysés [20]. Les différentes techniques de caractérisation réalisées sur les fractions obtenues après valorisation sont résumées dans le Tableau 1.

Produit	Analyse	Appareil
Gaz de pyrolyse ou gaz de synthèse	Composition % molaire (N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , etc.)	Micro-GC, Agilent technologies 3000A
Bio-huile (avec ou sans raffinage)	CHNS/O	Analyseur élémentaire
	PCS	Bombe calorimétrique Parr 6200
	Viscosité à 40 °C [21]	Viscosimètre vibrant (SV-10)
	Densité	Pycnomètre
	Composition moléculaire	Chromatographie gazeuse couplée à une spectrométrie de masse (GC-MS)
Biochar/ charbon actif	CHNS/O	Analyseur élémentaire
	Propriétés texturales [22]	Azote adsorption-désorption (BET)
	Concentration de bore (ouate de cellulose)	Spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS)
	PCS	Bombe calorimétrique Parr 6200

Tableau 1 : Les différentes techniques de caractérisation réalisées sur les fractions obtenues

#### 4.2.2. Bilan de masse et d'énergie

Un bilan de masse et d'énergie a été réalisé pour chaque matériau et les pertes ont été estimées. Le ratio d'énergie nette du processus de pyrolyse dépasse les 300% pour tous les matériaux. Les rendements des produits de pyrolyse obtenus sont représentés dans la Figure 4. Les bilans massiques totaux de la pyrolyse des 5 matériaux biosourcés sont les suivants : HF (95,3 %) > MF (87,6 %) > WF (85,1 %) > CW (78,5 %) > RT (71,7 %). Les pertes variaient de 5 à 28 % conformément à la littérature [19,23–25]. Les pertes les plus élevées ont été constatées avec les matériaux produisant la plus grande viscosité de bio-huile (CW) ou la plus faible quantité de bio-huile (RT), tandis que les pertes ont été minimisées dans le cas des bio-huiles de plus faible viscosité (HF, MF, et WF). Les principales raisons des pertes sont : la condensation des goudrons dans les tubes et tuyaux du réacteur, le petit condenseur à glace (perte de condensables), la collecte incomplète de la bio-huile en raison de la viscosité élevée des goudrons (CW) et/ou de la très faible quantité de bio-huile (RT), la volatilisation de certains composés dans la phase liquide après refroidissement ainsi que la détection de certains gaz spécifiques et non tous les gaz émis pendant la pyrolyse.

La fraction condensable était le produit le plus abondant, représentant environ 41,44, 52,72 et 49,78 % en masse de HF, MF et WF, respectivement. Les rendements en condensables élevés des HF et MF sont attribués au liant plastique ainsi qu'au faible traitement de ces produits. En revanche, cette phase était faible pour le CW (28,34 % en poids) et le RT (26,53 % en poids). Les rendements du wax étaient proches de 10 % en poids pour tous les produits sauf pour le RT (22,36 % en poids). Ce rendement le plus élevé en produits cireux est attribué à la dégradation thermique des fibres de PET bi-composant à faible fusion qui favorisent la formation de cire au détriment de la bio-huile (0,71 % en poids) [26]. Parmi les produits, le MF a donné le rendement le plus élevé en bio-huile (22,31 % en poids), suivi du HF (14,55 % en poids) et du WF (11,03 % en poids). Ce rendement en bio-huile le plus élevé pourrait être produit à partir de la dégradation de la paille de lin [27].

Les rendements en biochar étaient les plus élevés pour CW, WF et RT, avec 36,25, 30,06 et 27,46 % en poids, respectivement. Cette carbonisation est favorisée dans ces matériaux car ils incorporent des proportions importantes de retardateurs de flamme [16,28–30]. Par ailleurs, le rendement élevé en biochar CW résulte aussi de sa forte teneur en cendres (minéraux).

Les rendements en gaz de synthèse étaient les plus élevés pour HF, MF et RT, soit environ 21,47, 18,16 et 17,69 % en poids, respectivement. Ceci s'explique par la décomposition secondaire de certains produits volatiles des fibres de polyester insaturé et de PET, respectivement [26,31].

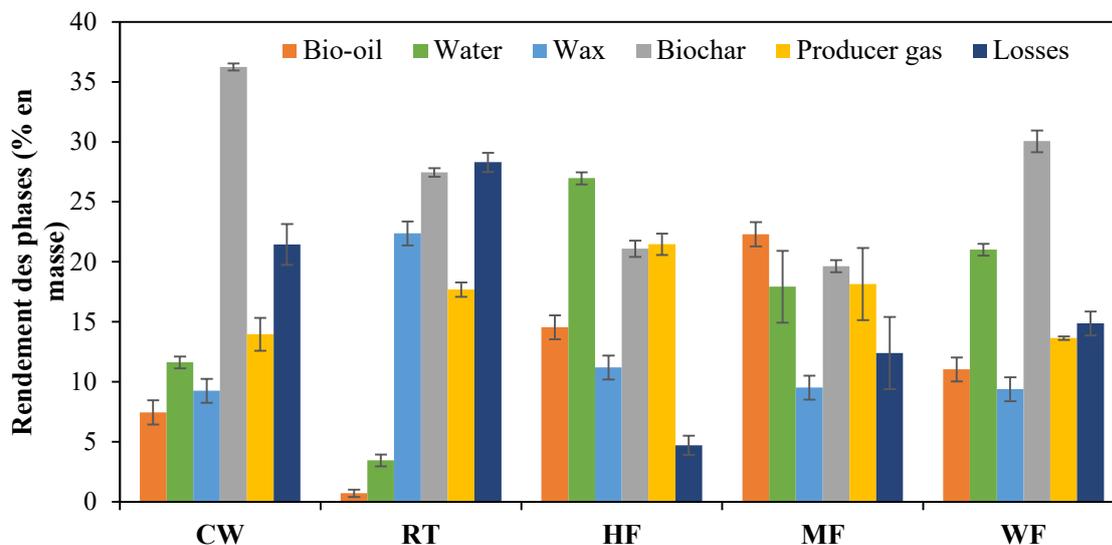


Figure 4 : Distribution des produits de pyrolyse des cinq matériaux d'isolation à base de biomasse [20]

#### 4.2.3. Analyses des produits de pyrolyse

Les propriétés des produits gazeux, solides et liquides ont été étudiées et leur application potentielle a été proposée. Les caractéristiques des produits de pyrolyse dépendent fortement de la composition du matériaux (additifs, liants). Le gaz de pyrolyse était principalement formé de plus de 50% en mole de CO<sub>2</sub>, ce qui explique son faible contenu énergétique (5-10 MJ/Nm<sup>3</sup>). La qualité de ces gaz peut être améliorée par un reformage post-catalytique afin d'accroître leur PCI, ce qui permettra leur utilisation comme combustible pour alimenter le processus. La pyrolyse du WF, HF et MF a donné lieu à un rendement important de bio-huiles (11-25 % en masse) aux propriétés médiocres (Annexe 3). Ces bio-huiles présentent un faible PCI (18-22 MJ/kg), une forte teneur en oxygène (40-48 % en masse) et une densité (> 1,1-1,3 kg/m<sup>3</sup>) et une viscosité (150-500 mPa.s) élevées, ce qui les rendait impropres à une application directe. Un raffinage est nécessaire pour leur valorisation ultérieure en biocarburant de transport. L'analyse du biochar a révélé que ces produits présentaient une teneur élevée en carbone (65-85 % en masse), un PCI élevé (20-32 MJ/kg) et une faible surface spécifique (0 à 18 m<sup>2</sup>/g), ce qui les rendaient aptes à être utilisés comme combustibles solides. La seule exception est le biochar du RT qui a révélé la plus grande surface spécifique de 375 m<sup>2</sup>/g et une structure microporeuse (66%), d'où son utilisation possible comme milieu poreux pour différentes applications (adsorption, craquage de goudrons, catalyse, traitement de l'eau/gaz, etc.)

La pyrolyse de la ouate de cellulose traitée avec des retardateurs de flamme a donné lieu aux propriétés les plus médiocres de la bio-huile et du biochar (viscosité la plus élevée 7200 mPa.s, PCI le plus bas, etc.) ; ce procédé n'est donc pas approprié pour ce type de matériau. Par conséquent, la pyrolyse est privilégiée pour les panneaux textiles pour la formation de biochar microporeux et les panneaux mixtes chanvre/bois/lin pour la production de bio-huile.

#### 4.2.4. Raffinage de la bio-huile issus des fibres de chanvre

La bio-huile produite étant de nature corrosive, acide, instable thermiquement, visqueuse, avec une forte teneur en oxygène et un faible PCI, son utilisation comme alternatif aux carburants conventionnels fossiles n'est pas possible. Il est donc nécessaire d'améliorer ces propriétés médiocres de la bio-huile par des techniques de raffinage avant son utilisation. Le raffinage de la bio-huile dans des conditions douces vise à réduire sa teneur en oxygène et à augmenter son PCI et sa stabilité thermique. La bio-huile raffinée pourrait donc être utilisée comme une source de biocarburant, vert et renouvelable, viable pour le transport maritime.

Dans ce contexte, un raffinage non-catalytique et catalytique de la bio-huile issue de la pyrolyse des panneaux de fibres de chanvre a été effectué à l'aide de l'éthanol supercritique à 260 °C dans un réacteur fermé pour l'élimination des composés oxygénés et l'amélioration ultérieure de la qualité de la bio-huile. L'effet des paramètres de réaction, y compris le rapport éthanol/bio-huile, le temps de réaction et les catalyseurs, sur les rendements et les propriétés de la bio-huile raffinée (PCI, viscosité, densité, CHNSO, etc.) a été étudié. Les résultats du raffinage de la bio-huile ont montré que le temps de réaction, le type de catalyseur et le rapport solvant/bio-huile affectaient la qualité de la bio-huile de pyrolyse. Les conditions optimales sont un temps de réaction de 30 minutes, un ratio solvant/bio-huile de 7/1 sans catalyseur. Cela a permis d'obtenir le rendement le plus élevé en bio-huile raffinée (85 % en masse), une bonne valeur de viscosité (20,10 mPa.s) et un PCS élevé (27 MJ/kg) (Figure 5). Le temps de réaction a affecté de manière significative la valeur du PCS. Les catalyseurs n'ont pas eu

d'influence considérable. Dans l'ensemble, les réactions dominantes sont l'estérification et l'éthérisation, qui, couplées à l'hydrogénation et à l'hydrodéoxygénation, ont conduit à une déoxygenation (décarboxylation et décarbonylation) de la bio-huile.

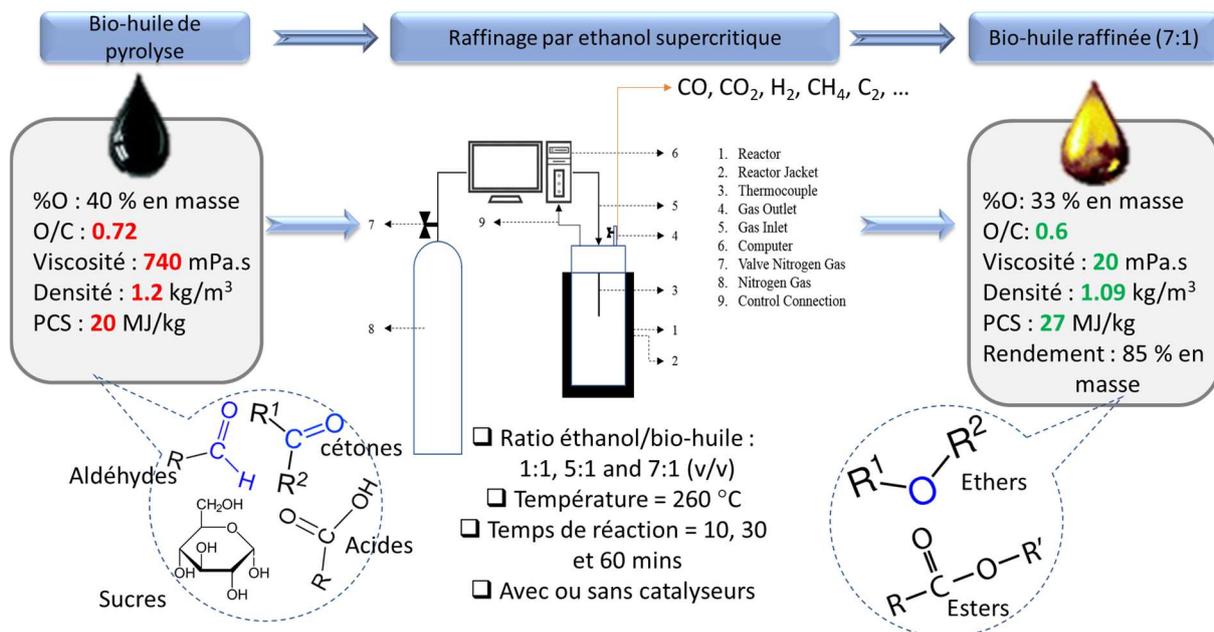


Figure 5 : Raffinage catalytique et non-catalytique de la bio-huile de pyrolyse en utilisant de l'éthanol supercritique (conditions optimales identifiées)

### 4.3. Pyro-gazéification

Dans un second temps, deux types d'essais de pyro-gazéification ont été menés :

1. Pyro-gazéification totale à la vapeur des 5 MIB pour la production d'un gaz de synthèse
2. Pyro-gazéification partielle à la vapeur uniquement sur les panneaux en textiles recyclés pour la production d'un charbon actif

#### 4.3.1. Pyro-gazéification totale à la vapeur d'eau

La pyro-gazéification totale à la vapeur des 5 MIB a été accomplie à 850 °C dans le même réacteur de la pyrolyse en présence de la vapeur d'eau surchauffée (Figure 3). La réaction a été maintenue pendant plusieurs heures jusqu'à la dégradation complète des produits et la formation de cendres de pyro-gazéification [20]. Pour tous les produits testés, le bilan massique était compris entre 67 et 85%, conformément aux valeurs indiquées dans la littérature 79 à 85% [19]. Les pertes résultent principalement de la récupération incomplète des goudrons lors de la collecte, de l'étalonnage de la Micro-GC (identification de quelques espèces résultantes du reformage et d'une fraction de cendres entraînée avec le flux d'azote vers les goudrons [32]). Les propriétés du gaz de synthèse ont été analysées (Figure 6). La pyro-gazéification à la vapeur a généré un gaz de synthèse riche en H<sub>2</sub> (50 % en moles) avec un PCI modéré (13-18 MJ/Nm<sup>3</sup>). Le gaz de synthèse dérivé de HF, MF et WF se composait principalement de 50 % de H<sub>2</sub>, de 30 % de CO et de 15 % de CO<sub>2</sub>, en raison des réactions water-gas shift et water-gas. Cependant, le gaz de synthèse résultant de CW et RT était composé de 50 % de H<sub>2</sub>, 15 % de CO, 25 % de CO<sub>2</sub> et 7 % d'hydrocarbures légers (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), en raison des retardateurs de flamme incorporés qui agissent comme des catalyseurs pour la réaction water-gas shift et empêchent la fragmentation des C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>.

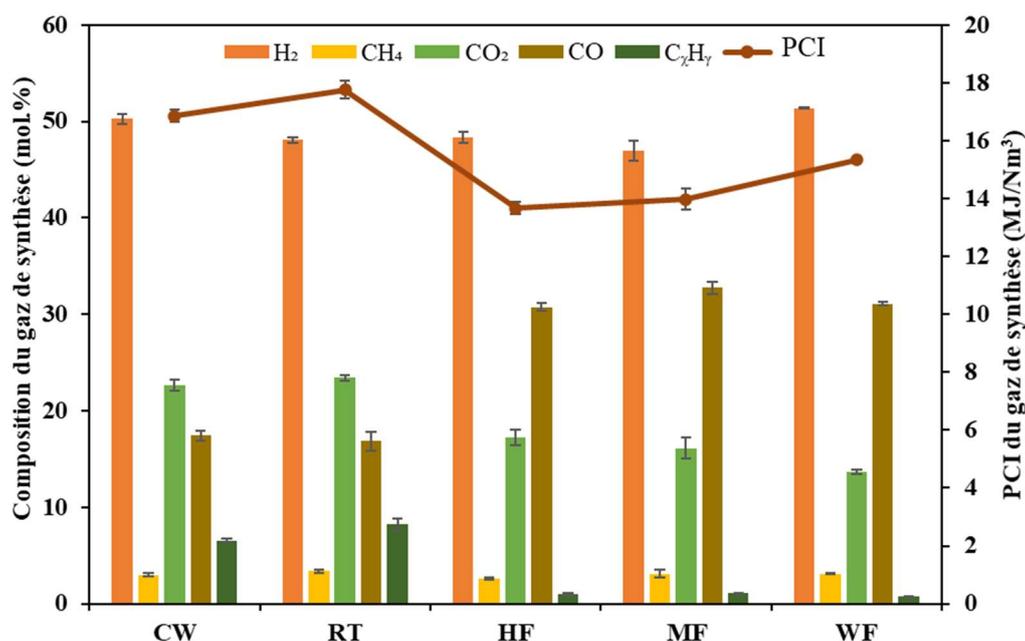


Figure 6 : Composition du gaz de synthèse obtenu par pyro-gazéification à 850°C des 5 MIB ciblés

Le rapport H<sub>2</sub>/CO est une caractéristique importante du gaz de synthèse car il donne un aperçu de sa voie de valorisation [33]. CW et RT présentent un rapport H<sub>2</sub>/CO de 2,8, ce qui favorise sa valorisation via le procédé Fischer-Tropsch pour la production des carburants diesel (Diesel-Kérosène, naphta, essence, etc.). Pour les autres MIB, ce rapport se situe entre 1,4 et 1,7, le procédé Fischer-Tropsch est donc privilégié pour la production de produits chimiques (paraffines, oléfines, etc.). Les cendres de pyro-gazéification de la ouate de cellulose sont concentrées en bore et en sulfate de magnésium, ce qui pourrait favoriser leur récupération de cette fraction [34,35]. La pyro-gazéification est privilégiée pour l'ouate de cellulose pour la production d'un gaz de synthèse et la récupération et la valorisation des minéraux des cendres.

#### 4.3.2. Production de charbon actifs à partir des textiles recyclés et leur utilisation dans le traitement d'eau

Le but de ce travail était d'évaluer le potentiel d'un biochar et d'un charbon actif, issus de RT, à être utilisés comme adsorbant pour éliminer l'ibuprofène d'une solution aqueuse. Pour cela, la production d'un charbon actif dérivé de RT a été réalisée par pyro-gazéification partielle à la vapeur à 850 °C maintenue pendant 1 heure. Les propriétés (morphologie, structure chimique, porosité, charges de surface et caractéristiques physico-chimiques) du charbon actif ont été comparées à celles du biochar de pyrolyse (Annexe 4). L'ibuprofène (IBP) est actuellement le troisième anti-inflammatoire non stéroïdien le plus utilisé au monde. Sa forte consommation sans ordonnance, son caractère hydrophile, sa nature bioactive et sa stabilité conduisent à sa large présence et à sa fréquente détection dans les eaux usées, les eaux de surface et les eaux souterraines [36]. Malgré sa faible concentration dans les systèmes aquatiques européens (60 à 3400 ng/L), l'IBP présente des effets préjudiciables sur la faune et la flore marine et des risques sur la santé humaine [37]. Les produits pharmaceutiques issus des effluents des ménages, des hôpitaux, des industries pharmaceutiques finissent dans les stations d'épuration des eaux usées (STEP) [38]. Les méthodes d'élimination physiques, chimiques ou biologiques conventionnelles des STEP ne sont pas assez efficaces et les technologies avancées disponibles sont coûteuses. Par conséquent, l'adsorption de l'IBP sur les chars et les charbons actifs élaborés à partir de déchets biosourcés a été identifiée comme une solution rentable [39]. En fonction de la surface spécifique de l'adsorbant et des groupes fonctionnels existants à sa surface, les contaminants peuvent être piégés dans les pores ou adhérer aux atomes de carbone.

Ensuite, l'utilisation de ces deux produits comme adsorbants potentiels pour l'élimination de l'ibuprofène des solutions aqueuses a été évaluée. Les performances d'adsorption en mode batch et continu ont été déterminées. Les expériences de cinétiques ont été étudiées à 20 °C pour la dose d'adsorbant de 500 mg sous une vitesse d'agitation de 200 rpm et une concentration d'ibuprofène de 50 mg/L jusqu'à l'équilibre. Le biochar microporeux a présenté une cinétique rapide et un temps d'équilibre de 24 heures. Quant au charbon actif, ce produit est microporeux et mésoporeux avait une cinétique plus lente et un temps d'équilibre de 120 heures. Les expériences d'isotherme ont été effectuées dans les mêmes conditions que la cinétique mais en variant la dose de l'adsorbent entre 100 et 700 mg. Une faible capacité d'adsorption maximale de 4 mg g<sup>-1</sup> est obtenue avec le biochar en raison du regroupement des molécules d'eau qui ont bloqués les pores du biochar empêchant l'adsorption de l'ibuprofène. Pour le charbon actif, l'isotherme d'adsorption a montré une adsorption maximale

élevée de 54 mg g<sup>-1</sup> à l'équilibre. La surface spécifique plus élevée et les pores développés sont à l'origine de la plus grande adhésion de l'ibuprofène sur le charbon actif.

La performance dynamique du charbon actif a été évaluée dans une colonne à lit fixe pour trois hauteurs de lit différentes (10, 20 et 30 cm). Les courbes expérimentales de percée ont été tracées (Figure 7). Dans la colonne à lit fixe, l'augmentation de la hauteur du lit augmente significativement le temps de passage et la capacité d'adsorption (40 mg g<sup>-1</sup> à saturation). Ceci est dû à la présence d'une masse plus importante d'adsorbants et de sites de liaison plus actifs, d'où un temps de contact plus élevé. Ce système continu a été capable de traiter 6,4 L de volume d'effluent au temps de percé et plus de 13,5 L à la saturation pour une hauteur de 30 cm. Le charbon actif pourrait être considéré comme un adsorbant alternatif efficace et peu coûteux pour l'élimination de l'IBP des milieux aqueux.

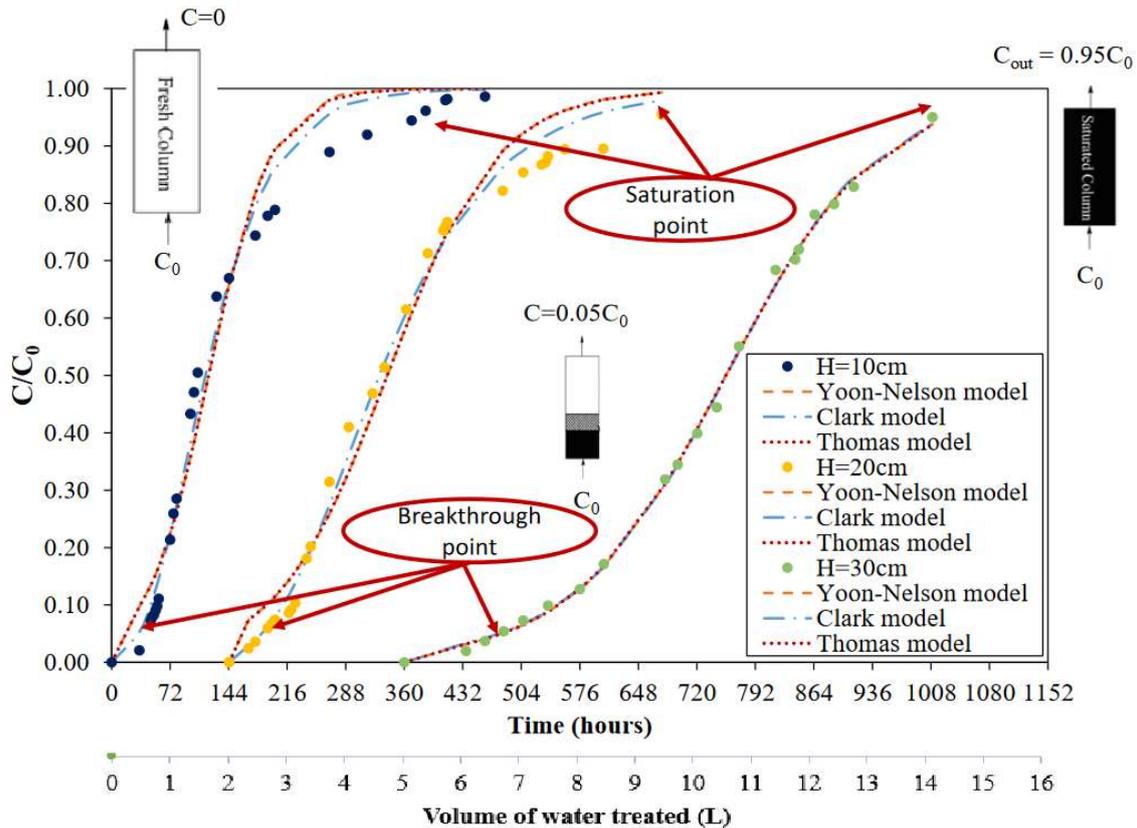


Figure 7 : Courbes de percées obtenues pour le charbon actif à trois hauteurs de lit différentes

#### 4.4. Combustion en Chaudière

Dans un troisième temps, la combustion du bois certifié (WR), des fibres de chanvre (HF), des fibres de bois (WF) et de mélanges (90%WR/10%WF et 90%WR/10%HF), a été réalisée dans une chaudière à biomasse horizontales à petite échelle (20 kW) dédié au chauffage domestique. Pour cela, des granulés obtenus ont été produits à partir des MIB identifiés, et ensuite caractérisés (Annexe 5). Les valeurs ont été comparées aux normes correspondantes (granulés de paille et de bois certifiés). Les pellets de fibres de chanvre ont satisfait à toutes les exigences des normes européennes pour les pellets non industriels alors que les granulés de fibres de bois ne respectent pas les limites normatives des teneurs en N et S. Puis, les performances environnementales (émissions gazeuses et particulaires) et énergétique (rendement énergétique) des WF et HF en chaudière ont été évaluées et comparées aux WR.

##### 4.4.1. Performance environnementale

L'utilisation de granulés provenant de matériaux d'isolation biosourcés a eu un impact considérable sur les émissions de gaz et de particules (Tableau 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les concentrations de CO étaient élevées dans les différents cas étudiés. Ce résultat pourrait être attribué à une ou plusieurs des raisons citées : la quantité insuffisante d'O<sub>2</sub> (faible excès d'air), la faible température de combustion, le faible mélange de la charge avec l'air ou le temps de séjour trop court des gaz dans la chambre de combustion [40]. Dans cette étude, la valeur de l'excès d'air était d'environ 1,6 pour tous les combustibles testés. Néanmoins, l'air et le combustible ne sont pas correctement mélangés dans la chaudière, ainsi l'apport continu d'air en excès peut avoir une action inverse en raccourcissant le temps de contact entre la biomasse et l'O<sub>2</sub> à haute température et en empêchant la combustion complète ; ce qui conduit à une concentration élevée de CO et de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>.

La nature très intermittente des émissions de CO est due au mode pulsé de la combustion, expliquant les écarts types importants [41,42].

Les émissions de NO<sub>x</sub> étaient plus élevées pour les WF (630 mg.Nm<sup>-3</sup>) et HF (578 mg.Nm<sup>-3</sup>) que pour le bois certifié WR (178 mg.Nm<sup>-3</sup>). Ceci est attribué à leur plus grande teneur en N (1,08 et 0,61 % en poids, respectivement) que le bois WR (< 0,3 % en poids). Cependant, la teneur en azote et la formation de NO<sub>x</sub> ne sont pas corrélées de façon linéaire car leurs émissions sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la tendance d'un matériau à former des cendres agglomérées et le rapport d'excès d'air [43]. La fraction élevée de NO<sub>x</sub> émise par la combustion de HF pourrait être due à la teneur élevée en N ainsi qu'à la teneur élevée en cendres de ce matériau (comprenant des éléments actifs tels que le K, Fe, Mg et Ca) catalysant la formation de NO<sub>x</sub> [44,45]. En outre, pour WF, sa teneur en N dépassant les 1,1 %, la combustion de ces granulés entraîne la formation d'espèces azotées, et la production de NO<sub>x</sub> est réduite [46]. Les granulés de HF et WF et les mélanges ne respectent pas les exigences légales d'émissions de NO<sub>x</sub> pour les chaudières < 500 kW. Les conditions de combustion doivent être optimisées pour atténuer la formation de NO<sub>x</sub>. Cela pourrait être réalisé par des mécanismes primaires (excès d'air plus faible), des mécanismes secondaires (réduction sélective catalytique ou non catalytique) ou le mélange de combustibles (95% WR avec 5% de HF ou WF).

Les émissions de SO<sub>2</sub> dépendent directement et fortement de la teneur en soufre des combustibles brûlés. Ainsi, WF émet le plus de SO<sub>2</sub> (2650 mg.Nm<sup>-3</sup> à cause de sa teneur en S de 1,18 % en masse). Ces émissions peuvent entraîner une détérioration du métal de la chaudière (problèmes de corrosion). Le WR et HF présentent des émissions de SO<sub>2</sub> assez faibles en raison de leur faible teneur en S < 0,06 %. Les émissions du mélange 90%WR/10%WF sont réduites à 312 mg.Nm<sup>-3</sup> en raison des faibles émissions du WR.

En outre, la concentration massique de particules était faible pour tous les granulés sauf le HF (360 mg.Nm<sup>-3</sup>). Ces émissions de particules dépendent de la teneur en cendres de la matière première et de sa composition, à savoir les éléments inorganiques volatils des cendres volantes K, Si, S et Cl. Pour toutes les matières premières testées, les particules submicroniques (< 1 µm) étaient dominantes (10<sup>4</sup> - 10<sup>6</sup> particules.cm<sup>-3</sup>).

Produit	WR	HF	WF	90%WR/10%WF	90%WR/10%HF	EN ISO 303-5 :2021 (chaudière < 500 kW)
CO (mg.Nm <sup>-3</sup> )	4890.0 ± 1003.7	4844.3 ± 1224.8	4903.2 ± 1046.5	4863.9 ± 1184.9	4839.7 ± 1090.3	3000 (classe 3)
NO <sub>x</sub> (mg.Nm <sup>-3</sup> )	178.2 ± 9.7	<b>578.0 ± 63.2</b>	<b>630.3 ± 56.8</b>	<b>294.1 ± 19.8</b>	<b>260.1 ± 15.1</b>	200 (classe 3)
SO <sub>2</sub> (mg.Nm <sup>-3</sup> )	38.1 ± 25.3	17.1 ± 8.0	<b>2649.8 ± 165.1</b>	311.7 ± 65.4	18.8 ± 12.5	Pas de seuils
PM <sub>10</sub> (mg.Nm <sup>-3</sup> )	65.4 ± 6.6	<b>359.8 ± 28.3</b>	38.3 ± 4.0	62.5 ± 31.3	50.2 ± 19.1	150 (classe 3)

Tableau 2 : Emissions particulaires et gazeuses obtenues de la combustion des divers matériaux et mélanges

#### 4.4.2. Performance énergétique

La comparaison de l'efficacité de la chaudière opérée avec les différents granulés testés et l'ampleur des différentes pertes de chaleur sont présentées dans le Tableau 3

Les pertes de chaleur dues à la chaleur sensible des gaz de combustion secs (HL1) et à l'enthalpie de la vapeur d'eau produite dans les gaz de combustion (HL2) sont les principales pertes de la chaudière, représentant plus de 85 % des pertes de chaleur totales. Les autres pertes sont moins importantes. Les pertes de chaleur due à la teneur en humidité du combustible (HL3) et due aux non brûlés (CO et C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) dans les gaz de combustion (HL4) sont moindres. HL1 repose sur le taux d'excès d'air entrant qui sera chauffé à la température de la flamme. L'excès d'air doit être le plus faible possible pour éviter de chauffer une énorme quantité d'azote qui entraînera des pertes de chaleur dans l'environnement. En outre, réduire la température des gaz de combustion en utilisant une chaudière basse température (90-140 °C) ou une chaudière à condensation (40-90 °C) maximiserait le rendement de la chaudière (93-97%).. L'utilisation de granulés provenant de déchets d'isolation biosourcés a eu une incidence marginale sur le rendement de la chaudière. L'efficacité de la combustion de la chaudière était proche de 80 % (sur la base du PCS) et de 85 % (sur la base du PCI). Selon la norme EN 303-5 :2021, le

rendement minimal de la chaudière sur la base du PCI doit être supérieur à 74% pour la classe 3. Par conséquent, la chaudière utilisée dans cette étude répond aux exigences normatives.

Les pertes de chaleur dues à la chaleur sensible des gaz de combustion secs (HL1) et à l'enthalpie de la vapeur d'eau produite dans les gaz de combustion (HL2) sont les principales pertes de la chaudière, représentant plus de 85 % des pertes de chaleur totales. Les autres pertes sont moins importantes. Les pertes de chaleur due à la teneur en humidité du combustible (HL3) et due aux non brûlés (CO et C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) dans les gaz de combustion (HL4) sont moindres. HL1 repose sur le taux d'excès d'air entrant qui sera chauffé à la température de la flamme. L'excès d'air doit être le plus faible possible pour éviter de chauffer une énorme quantité d'azote qui entraînera des pertes de chaleur dans l'environnement. En outre, réduire la température des gaz de combustion en utilisant une chaudière basse température (90-140 °C) ou une chaudière à condensation (40-90 °C) maximiserait le rendement de la chaudière (93-97%).

	WR	HF	WF	90%WR/10%WF	90%WR/10%HF
Rendement énergétique	79.82	80.448	79.09	80.54	80.01
HL1	10.13	10.00	11.27	9.49	10.14
HL2	7.70	8.53	8.34	7.71	7.82
HL3	1.19	0.34	0.22	1.09	1.12
HL4	1.48	1.60	1.61	1.49	1.58

Tableau 3 : Rendement énergétique de la chaudière et analyse des pertes

## 5. Conclusion

La valorisation énergétique des matériaux d'isolation biosourcés permet la production de produits à valeur ajoutée. La pyrolyse des fibres de bois, fibres de chanvre et fibres mixtes aboutit à la production d'une quantité importante de bio-huile dont les propriétés peuvent être améliorées par un raffinage en utilisant de l'éthanol supercritique puis valorisée en biocarburant pour le transport maritime. La pyro-gazéification totale de l'ouate de cellulose produit un gaz de synthèse à haute densité énergétique et permet la concentration du bore et des sulfates de magnésium dans les cendres de pyro-gazéification. Ces derniers peuvent être récupérés de cette fraction et valorisés. La pyro-gazéification partielle de des panneaux de textiles recyclés génère un charbon actif mésoporeux et microporeux capable d'absorber 54 mg d'ibuprofène par gramme de charbon actif (en mode batch) et permet le traitement de 13.5 L d'eau lit-fixe (en continue). Les granulés de matériaux biosourcés mélangés à du bois certifié semble être un combustible prometteur pour les chaudières à biomasse atténuant la pression sur le bois.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] Dutreix N, Baecher C, Pianu B, Marx I, Habasque M, Bou Cherifi F, et al. Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois). Paris: Nomadéis; 2017.
- [2] Colombel R. Forte croissance du marché des isolants biosourcés. Batiweb 2021. <https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/www.batiweb.com> (accessed May 12, 2022).
- [3] Joreau O. Les isolants biosourcés doubleront leurs capacités de production d'ici 2025. BATIRADIO 2021. <https://www.batiradio.com/podcasts/megatrends/metiers/les-isolants-biosources-doubleront-leurs-capacites-de-production-dici-2025/> (accessed May 12, 2022).
- [4] Jones D, Brischke C, editors. 5 - Performance of the bio-based materials. Performance of Bio-based Building Materials, Woodhead Publishing; 2017, p. 249–333. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00005-7>.
- [5] ADEME, Tech2Market, FRD, NaturePlast. Identification des gisements et valorisation des matériaux biosourcés en fin de vie en France. ADEME; 2014.
- [6] Esa MR, Halog A, Rigamonti L. Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. *J Mater Cycles Waste Manag* 2017;19:1144–54. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0516-x>.
- [7] Casas-Ledón Y, Daza Salgado K, Cea J, Arteaga-Pérez LE, Fuentealba C. Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark fibers. *Journal of Cleaner Production* 2020;249:119356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119356>.
- [8] Marceau S, Glé P, Gueguen M, Gourlay E, Moscardelli S, Nour I, et al. Assessment of the durability of bio-based insulating materials. *Academic Journal of Civil Engineering* 2015;33:198–202. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.30>.
- [9] Nussholz JKL, Nygaard Rasmussen F, Milios L. Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy. *Resources, Conservation and Recycling* 2019;141:308–16. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.036>.
- [10] Besse P, Valkhoff H, Floissac L. Disponibilités en terres arables métropolitaines pour une production soutenable de matériaux biosourcés pour la construction / réhabilitation de bâtiments compatibles avec les objectifs « Grenelle » 2014.
- [11] Rabbat C, Awad S, Villot A, Rollet D, André Y. Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2022;156:111962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111962>.
- [12] EN ISO 18134-1:2015 - Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method. Switzerland: ISO; 2015.
- [13] ISO 18122:2015 - Solid biofuels — Determination of ash content. n.d.
- [14] ISO 16948:2015 - Solid biofuels — Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen. Switzerland: ISO; 2015.
- [15] EN ISO 18125:2017 - Solid biofuels - Determination of calorific value. Switzerland: ISO; 2018.
- [16] Vargun E, Baysal E, Turkoglu T, Yuksel M, Toker H, Vargun E, et al. Thermal degradation of oriental beech wood impregnated with different inorganic salts. *Maderas Ciencia y Tecnología* 2019;21:163–70. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000204>.
- [17] ISO 18123:2015 - Solid biofuels — Determination of the content of volatile matter. Switzerland: ISO; 2015.
- [18] FD U44-162 Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique. AFNOR Editions; 2016.
- [19] Pena J, Villot A, Gerente C. Pyrolysis chars and physically activated carbons prepared from buckwheat husks for catalytic purification of syngas. *Biomass and Bioenergy* 2020;132:105435. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105435>.
- [20] Rabbat C, Awad S, Villot A, André Y. Towards the Production of High Added-Value Products from the Pyrolysis and Steam Pyro-Gasification of Five Biomass-Based Building Insulation Materials at End-of-Life. *Waste and Biomass Valorization* 2022. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01989-2>.
- [21] D02 Committee. ASTM D445-21 -- Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). ASTM International; n.d. <https://doi.org/10.1520/D0445-21>.
- [22] ISO 9277:2010 - Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption — BET method. ISO n.d. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/04/49/44941.html> (accessed October 11, 2022).
- [23] Agblevor FA, Besler S. Inorganic Compounds in Biomass Feedstocks. 1. Effect on the Quality of Fast Pyrolysis Oils. *Energy Fuels* 1996;10:293–8. <https://doi.org/10.1021/ef950202u>.
- [24] Mullen CA, Boateng AA, Goldberg NM, Lima IM, Laird DA, Hicks KB. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy* 2010;34:67–74. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>.
- [25] Imam T, Capareda S. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2012;93:170–7. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.010>.

- [26] Jia H, Ben H, Luo Y, Wang R. Catalytic Fast Pyrolysis of Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) with Zeolite and Nickel Chloride. *Polymers (Basel)* 2020;12:705. <https://doi.org/10.3390/polym12030705>.
- [27] Mukhambet Y, Shah D, Tatkeyeva G, Sarbassov Y. Slow pyrolysis of flax straw biomass produced in Kazakhstan: Characterization of enhanced tar and high-quality biochar. *Fuel* 2022;324:124676. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124676>.
- [28] Di Blasi C, Branca C, Galgano A. Flame retarding of wood by impregnation with boric acid – Pyrolysis products and char oxidation rates. *Polymer Degradation and Stability* 2007;92:752–64. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.02.007>.
- [29] Yunchu H, Peijiang Z, Songsheng Q. TG-DTA studies on wood treated with flame-retardants. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 2000;58:35–8. <https://doi.org/10.1007/s001070050382>.
- [30] Tang W, Neill W. Effect of Flame Retardants on Pyrolysis and Combustion of Cellulose. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia* 2007;6:65–81. <https://doi.org/10.1002/polc.5070060109>.
- [31] Williams PT, Cunliffe A, Jones N. Recovery of value-added products from the pyrolytic recycling of glass-fibre-reinforced composite plastic waste. *Journal of the Energy Institute* 2005;78:51–61. <https://doi.org/10.1179/174602205X40504>.
- [32] Pena JJ. Study of chars prepared from biomass wastes : material and energy recovery. These de doctorat. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire, 2018.
- [33] Chae jung-il, Kim T, Lee K, Jo, Ryu, Kang J-W, et al. Catalytic Technologies for CO Hydrogenation for the Production of Light Hydrocarbons and Middle Distillates. *Catalysts* 2020;10:99. <https://doi.org/10.3390/catal10010099>.
- [34] Wahbeh B, Hamed TA, Kasher R. Hydrogen and boric acid production via boron hydrolysis. *Renewable Energy* 2012;48:10–5. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.043>.
- [35] Colson V, Bourebrab M, Dalmais M, Jadeau O, Lanos C. Formulation of novel fire retardant additives for biobased insulation material. *Academic Journal of Civil Engineering* 2019;37:134–41. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.19>.
- [36] Kermia AEB, Fouial-Djebbar D, Trari M. Occurrence, fate and removal efficiencies of pharmaceuticals in wastewater treatment plants (WWTPs) discharging in the coastal environment of Algiers. *Comptes Rendus Chimie* 2016;19:963–70. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.05.005>.
- [37] Mondal S, Bobde K, Aikat K, Halder G. Biosorptive uptake of ibuprofen by steam activated biochar derived from mung bean husk: Equilibrium, kinetics, thermodynamics, modeling and eco-toxicological studies. *Journal of Environmental Management* 2016;182:581–94. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.018>.
- [38] Chopra S, Kumar D. Ibuprofen as an emerging organic contaminant in environment, distribution and remediation. *Heliyon* 2020;6:e04087. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04087>.
- [39] Oba SN, Ighalo JO, Aniagor CO, Igwegbe CA. Removal of ibuprofen from aqueous media by adsorption: A comprehensive review. *Science of The Total Environment* 2021;780:146608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146608>.
- [40] Verma VK, Bram S, Delattin F, Laha P, Vandendael I, Hubin A, et al. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy* 2012;90:17–23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.079>.
- [41] Ozgen S, Caserini S, Galante S, Giugliano M, Angelino E, Marongiu A, et al. Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets. *Atmospheric Environment* 2014;94:144–53. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.032>.
- [42] Lamberg H, Sippula O, Tissari J, Jokiniemi J. Effects of Air Staging and Load on Fine-Particle and Gaseous Emissions from a Small-Scale Pellet Boiler. *Energy Fuels* 2011;25:4952–60. <https://doi.org/10.1021/ef2010578>.
- [43] Zeng T, Weller N, Pollex A, Lenz V. Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices. *Fuel* 2016;184:689–700. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.047>.
- [44] Carvalho L, Wopienka E, Pointner C, Lundgren J, Verma VK, Haslinger W, et al. Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy* 2013;104:286–96. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.058>.
- [45] Glarborg P, Jensen AD, Johnsson JE. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science* 2003;29:89–113. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(02\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00031-X).
- [46] Garcia-Maraver A, Zamorano M, Fernandes U, Rabaçal M, Costa M. Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler. *Fuel* 2014;119:141–52. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.037>.

## LISTE DES ANNEXES

### Annexe 1 : Composition des matériaux isolants biosourcés ciblés

Matériaux biosourcés		Ouate de cellulose (CW)		Textiles recyclés (RT)		Fibres de chanvres (HF)		Fibres mixtes (MF)		Fibres de bois semi-rigides (WF)	
Forme		En vrac		Panneaux		Panneaux		Panneaux		Panneaux	
Surface isolante		Isolation des combles et des toitures		Isolation des murs intérieurs		Murs intérieurs et extérieurs, combles aménagés et perdus, plafond et planchers		Murs intérieurs et extérieurs, combles aménagés et perdus, plafond et planchers		Isolation des murs intérieurs	
Composition (% masse à la	<b>Biomasse</b>	Papiers et papiers de journaux	89 ±1	Fibres de coton	70 ±5	Fibres de chanvre	90	Fibres de chanvre, lin et coton	91 ±2	Fibres de bois résineux	95 ±2
				Laine et acrylique	15						
	<b>Liant</b>			Fibres polyester bi-composantes	15 ±2	Fibres synthétiques de polyester	< 10	Fibres synthétiques de polyester	9 ±2	Fibres polyoléfinés (PP, PE)	5 ±2
		<b>Additifs</b>	Acide borique	4 ±0.5	Retardateur de flamme*	10 ±2	Traitement antifongique	<0.2	Traitement antifongique	<0.5	
Sulfate de magnésium	7 ±0.5		Traitements antibactériens et antifongiques	0.8 ±0.2							
Caractéristiques	<b>Densité en kg/m<sup>3</sup></b>	23 to 35		20 à 30		40		30		55	
	<b>Dimension en cm</b>			120 x 60		125 x 60		340 x 60		122 x 57.5	
	<b>Epaisseur en mm</b>			100		100		100		40	

Tableau A 1 : Composition des matériaux isolants biosourcés ciblés et commercialisés en France

## Annexe 2 : Caractérisation des matériaux isolants biosourcés ciblés

Analyses		Ouate de cellulose (CW)	Textiles recyclés (RT)	Fibres de chanvres (HF)	Fibres mixtes (MF)	Fibres de bois semi-rigides (WF)
Analyse élémentaire (% massique sur base sèche)	<b>C</b>	37.55 ± 0.37	45.14 ± 0.40	46.3 ± 0.70	46.20 ± 0.20	49.40 ± 0.30
	<b>H</b>	5.15 ± 0.07	5.34 ± 0.10	6.16 ± 0.04	5.94 ± 0.07	6.66 ± 0.10
	<b>N</b>	n.d.	1.50 ± 0.02	0.61 ± 0.03	0.31 ± 0.01	1.08 ± 0.02
	<b>S</b>	0.98 ± 0.09	n.d.	0.044	n.d.	1.18
	<b>O<sup>a</sup></b>	40.06 ± 0.90	47.05 ± 0.40	44.32 ± 0.70	46.09 ± 0.20	41.28 ± 0.30
Analyse immédiate	<b>Humidité (% massique à la réception)</b>	9.44 ± 0.30	4.99 ± 0.10	6.25 ± 0.04	4.93 ± 0.06	6.17 ± 0.80
	<b>Taux de cendres (% massique sur base sèche)</b>	16.26 ± 1.60	0.97 ± 0.05	2.57 ± 0.05	1.46 ± 0.03	0.40 ± 0.10
	<b>Matières volatiles (% massique)</b>	67.13 ± 1.20	75.05 ± 0.60	79.28 ± 0.30	82.36 ± 0.80	71.15 ± 0.30
	<b>Carbone Fixe<sup>b</sup> (% massique)</b>	7.17 ± 0.90	18.99 ± 0.50	12.14 ± 0.30	11.25 ± 0.60	22.31 ± 0.40
Composition (% massique sur base sèche)	<b>Hémicellulose</b>	10.59	1.96	7.03	5.63	12.17
	<b>Cellulose</b>	39.92	53.72	68.76	40.12	47.77
	<b>Lignine</b>	29.45	37.37	12.72	49.56	27.65
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	<b>PCS</b>	14.59 ± 0.30	18.05 ± 0.40	18.24 ± 0.60	18.17 ± 0.10	19.74 ± 0.60
	<b>PCI</b>	13.55 ± 0.30	16.97 ± 0.40	17.04 ± 0.60	16.97 ± 0.10	18.51 ± 0.60

Tableau A 2 : Caractéristiques des produits de construction biosourcés ciblés

n.d: non détecté

<sup>a</sup> calculé par différence de C, H, N, S et taux de cendres

### Annexe 3 : Pyrolyse : caractérisation des fractions lourdes et légères

		CW		RT		HF		MF		WF	
		Bio-huile	Wax								
Analyse élémentaire (% massique sur base sèche)	<b>N</b>	n.d.	n.d.	4.28 ± 0.02	0.90 ± 0.50	0.58 ± 0.04	0.67 ± 0.01	0.51 ± 0.01	0.88 ± 0.03	1.34 ± 0.01	0.79 ± 0.04
	<b>C</b>	45.23 ± 0.30	34.80 ± 1.60	37.99 ± 0.07	56.23 ± 1.10	49.34 ± 1.60	58.00 ± 1.00	48.17 ± 0.50	66.79 ± 0.40	42.40 ± 0.30	62.88 ± 0.30
	<b>H</b>	5.40 ± 0.10	3.61 ± 0.40	5.36 ± 0.20	4.23 ± 0.20	6.26 ± 0.30	5.47 ± 0.10	5.72 ± 0.20	5.36 ± 0.60	5.19 ± 0.20	7.14 ± 0.40
	<b>S</b>	0.76 ± 0.06	0.37 ± 0.20	5.71 ± 0.20	0.56 ± 0.10	0.07 ± 0.10	n.d.	n.d.	n.d.	2.40 ± 0.30	0.45 ± 0.04
	<b>O</b>	45.05 ± 0.30	55.40 ± 1.80	45.85 ± 0.50	37.10 ± 1.20	43.47 ± 1.90	35.64 ± 1.00	45.40 ± 0.60	26.73 ± 0.40	47.99 ± 0.50	28.37 ± 0.70
Taux de cendres (% massique sur base sèche)		3.56	5.82	0.80	0.98	0.29	0.22	0.20	0.25	0.68	0.37
PCI (MJ/kg)		17.54	12.74	16.46	20.72	20.94	21.21	20.06	26.07	18.60	26.65
Viscosité à 40 °C (mPa.s)		7420		n.m		149		283		494	
Densité (kg/m <sup>3</sup> )		n.m		n.m		1.25		1.21		1.30	

Tableau A 3 : Caractéristiques des condensats de pyrolyse lourds (wax) et légers (bio-huile) obtenus à partir des matériaux isolants biosourcés

n.m = non mesuré

n.d = non détecté

## Annexe 4 : Caractérisation du charbon actif

Analyse	Unit		RT-biochar	RT-charbon actif
Analyse élémentaire	C	% massique sur base sèche	79.56 ± 0.60	87.15 ± 0.44
	H		2.65 ± 0.10	0.78 ± 0.04
	N		3.94 ± 0.20	1.68 ± 0.01
	S		n.d.	1.06 ± 0.11
	O*		10.95 ± 0.20	5.14 ± 0.49
Ratio atomique	H/C		0.40	0.10
	(O+N)/C		0.15	0.06
Teneur en cendres		% massique sur base sèche	2.90 ± 0.10	4.19 ± 0.17
BET surface spécifique		m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	375 ± 15	560 ± 15
Volume total des pores	V <sub>total</sub>	cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>	0.2093	0.3297
Mésopores	V <sub>meso</sub>	cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>	0.0141	0.0806
	V <sub>meso</sub> /V <sub>total</sub>	%	6.7	24.5
Micropores	V <sub>micro</sub>	cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>	0.1372	0.2415
	V <sub>micro</sub> /V <sub>total</sub>	%	65.5	73.3
HK largeur médiane des pores		nm	0.52	1.20
BJH diamètre de pores moyen		nm	2.14	2.33
Charge de surface (pH <sub>PZC</sub> )			8.9	10
Morphologie			Plane et lisse	Irrégulière et rugueuse

Tableau A 4 : Propriétés physico-chimiques, texturales et morphologie du biochar et charbon actif issus du RT

n.d. = non détecté

## Annexe 5 : Combustion des granulés WR, HF et WF

Paramètres analytique	Unités	Granulés expérimentaux			NF EN ISO 17225-2	NF EN ISO 17225-6
		DINplus granulés bois (WR)	Fibres de bois (WF)	Fibres de chanvre (HF)	Classes de granulés bois	Classe de granulés agricole
Granulés entre 3.15 et 40 mm	wt.% wb	100.0	98.7	100.0	≥99.0	≥ 99.0
Diamètre	mm	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0 to 10.0
Humidité	wt.% ar	8.0	1.6	2.2	≤ 10	≤ 10
Résistance mécanique	wt.% ar	≥ 97.5	<b>94.6</b>	99.2	≥ 96.5	≥ 97.5
Densité apparente	kg.m <sup>-3</sup> ar	≥ 600	610	740	≥ 600	≥ 600
Fines < 3.15 mm	wt.% wb	≤ 1	<b>4.0</b>	0.4	≤ 1	≤ 1
Additif	wt.% wb	0	≤ 2	≤ 3	≤ 2	≤ 5
Cendres à 550°C	wt.% db	≤ 0.7	0.40	2.57	≤ 2.0	≤ 6.0
Total carbone	wt.% db	49.62	49.4	46.3		
Total hydrogène		6.06	6.66	6.16		
Total azote		≤ 0.3	<b>1.08</b>	0.61	≤ 1.0	≤ 0.7
Total soufre		≤ 0.03	<b>1.180</b>	0.044	≤ 0.05	≤ 0.1
Total chlore		≤ 0.02	0.008	0.09	≤ 0.03	≤ 0.1
PCS		MJ.kg <sup>-1</sup> db	19.81	20.420	18.167	≥ 16.5
PCI	MJ.kg <sup>-1</sup> ddb	18.578	19.050	16.898		
Température de contraction initiale	°C	> 1000	820	640	A mentionner si T > 550 °C	
Température de déformation	°C	> 1200	1260	1160		
Température hémisphère	°C	> 1500	> 1500	> 1500		
Température d'écoulement	°C	> 1500	> 1500	> 1500		

Tableau A 5 : Propriétés des granulés utilisés dans la chaudière biomasse et les valeurs limites réglementaires

wt.% db = % en masse base sèche, wt.% wb = % en masse base humide, wt.% ar = % en masse à la réception

## INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

---

---

### TABLEAUX

Tableau 1 : Les différentes techniques de caractérisation réalisées sur les fractions obtenues .....	13
Tableau 2 : Emissions particulaires et gazeuses obtenues de la combustion des divers matériaux et mélanges .....	18
Tableau 3 : Rendement énergétique de la chaudière et analyse des pertes.....	19
Tableau A 1 : Composition des matériaux isolants biosourcés ciblés et commercialisés en France .....	22
Tableau A 2 : Caractéristiques des produits de construction biosourcés ciblés .....	23
Tableau A 3 : Caractéristiques des condensats de pyrolyse lourds (wax) et légers (bio-huile) obtenus à partir des matériaux isolants biosourcés .....	24
Tableau A 4 : Propriétés physico-chimiques, texturales et morphologie du biochar et charbon actif issus du RT .....	25
Tableau A 5 : Propriétés des granulés utilisés dans la chaudière biomasse et les valeurs limites réglementaires .....	26

### FIGURES

Figure 1 : La méthodologie adoptée dans cette étude (MIB : matériaux d'isolation biosourcés).....	7
Figure 2 : Comparaison des matériaux isolants biosourcés retenus par un diagramme de Kiviat .....	9
Figure 3: Configuration du réacteur utilisé pour la pyrolyse et la gazéification des différents MIB ciblés.....	12
Figure 4 : Distribution des produits de pyrolyse des cinq matériaux d'isolation à base de biomasse [20] .....	14
Figure 5 : Raffinage catalytique et non-catalytique de la bio-huile de pyrolyse en utilisant de l'éthanol supercritique (conditions optimales identifiées) .....	15
Figure 6 : Composition du gaz de synthèse obtenu par pyro-gazéification à 850°C des 5 MIB ciblés.....	16
Figure 7 : Courbes de percées obtenus pour le charbon actif à trois hauteurs de lit différentes .....	17

## SIGLES ET ACRONYMES

---

<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
<b>MIB</b>	Matériaux d'isolation biosourcés
<b>RE</b>	Réglementation environnementale
<b>FDES</b>	Fiches de déclarations environnementales et sanitaires
<b>CW</b>	Ouate de cellulose en vrac
<b>WF</b>	Panneaux semi-rigides en fibres de bois
<b>RT</b>	Panneaux de textiles recyclés
<b>HF</b>	Panneaux de fibres de chanvre
<b>MF</b>	Panneaux mixtes composés de fibres de lin, de chanvre et de coton (MF).
<b>PCS</b>	Pouvoir calorifique supérieur
<b>PCI</b>	Pouvoir calorifique inférieur
<b>ATG</b>	Analyse thermogravimétrique
<b>MV</b>	Matières volatiles
<b>GC</b>	Chromatographie gazeuse
<b>IBP</b>	Ibuprofène
<b>STEP</b>	Stations d'épuration des eaux usées
<b>WR</b>	Bois certifié
<b>CO</b>	Monoxyde de carbone
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de soufre
<b>NO<sub>x</sub></b>	Oxydes d'azote
<b>PM<sub>10</sub></b>	Particules (diamètre inférieur à 10 µm)
<b>HL1</b>	Perte de chaleur due à la chaleur sensible des gaz de combustion secs
<b>HL2</b>	Perte de chaleur due à l'enthalpie de la vapeur d'eau produite dans les gaz de combustion
<b>HL3</b>	Perte de chaleur due à la teneur en humidité du combustible
<b>HL4</b>	Perte de chaleur due aux non brûlés (CO et C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) dans les gaz de combustion

## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

## Etude des Scénarios en fin de vie des isolants biosourcés

La nouvelle réglementation environnementale du bâtiment "RE2020" va entrer en vigueur à compter de juillet 2021. Elle intègre des évolutions extrêmement importantes qui devraient à terme profondément modifier le secteur de la conception et de la construction et faire évoluer la nature des produits et matériaux de construction les plus employés en faveur des isolants biosourcés

Le projet souhaite apporter des connaissances scientifiques sur ces matériaux et proposer des méthodes, protocoles ou recommandations vis-à-vis de leur fin de vie en analysant les potentialités de filières de valorisations des matériaux biosourcés, notamment énergétiques.

*Cette étude apporte des premiers enseignements vis-à-vis de la fin de vie des isolants biosourcés*, en analysant les potentialités de filières de valorisation des matériaux biosourcés. Les travaux en laboratoire se sont concentrés notamment sur la valorisation énergétique afin d'analyser les comportements des isolants biosourcés selon différentes méthodes.

