

Valorisation des déchets d'éléments d'ameublement (DEA) dans l'isolation thermique des bâtiments : Caractérisation thermo-physique et analyse de cycle de vie

Laurice EL KHOURY^{1*}, Ons HAMD AOUI¹, Hamza ALLAM², Marie-Lise PANNIER³, Thibault PERIN⁴, Laurent IBOS¹

¹Univ Paris Est Créteil, CERTES – F-77567 Lieusaint, France

²Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295 – F-33400 Talence, France

³Univ Angers, LARIS, SFR MATHSTIC – F-49000 Angers, France

⁴Univ Paris Est Créteil, CERTES, F-94010 Créteil, France

*(auteur correspondant : laurice.el-khoury@u-pec.fr)

Résumé - Dans le cadre de la transition vers la neutralité carbone d'ici 2050 et en application de la loi AGEC (loi anti-gaspillage pour une économie circulaire), cette étude explore l'intégration des combustibles solides de récupération (CSR), issus des déchets d'éléments d'ameublement (DEA), dans des matériaux d'isolation pour le bâtiment. La gestion des CSR, composés de matériaux hétérogènes, nécessite un quartage pour garantir des échantillons représentatifs. L'analyse granulaire a été réalisée, et les propriétés thermiques ont été mesurées pour différentes masses volumiques (de 89 à 266 kg/m³). Les résultats montrent une conductivité thermique qui varie entre 0,065 et 0,086 W/(m.K). En parallèle, une analyse de cycle de vie (ACV) de la production des CSR a été accomplie et sera traitée dans cet article.

1. Introduction

La France s'est fixée un objectif ambitieux : atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, comme le prévoient la Loi de Transition Énergétique et la Loi Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire (AGEC) [1]. Ces mesures législatives mettent en avant une gestion durable des déchets comme élément essentiel pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, conserver les ressources naturelles et promouvoir une économie circulaire. Cette approche globale souligne la nécessité de stratégies innovantes pour transformer les déchets en ressources, réduisant ainsi l'impact environnemental tout en stimulant la résilience économique.

Les Déchets d'Éléments d'Ameublement (DEA) sont des articles de mobilier usagés composés de matériaux hétérogènes tels que le bois, la mousse, les textiles, les plastiques, les élastomères, les métaux et d'autres déchets complexes. Ces déchets sont en augmentation [2]. En France, environ 1,2 million de tonnes de DEA sont produits chaque année [3], ce qui pose des défis significatifs pour les processus de recyclage et conduit à ce que des volumes importants non recyclés. Ces déchets non recyclables et non dangereux sont les Combustibles Solides de Récupération (CSR) [4].

Bien que précieuse, la valorisation énergétique des CSR n'explore pas pleinement leur potentiel dans le cadre plus large des principes de l'économie circulaire [2]. Le secteur de la construction en France est l'un des plus grands consommateurs d'énergie et contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre. Il représente une opportunité pour réorienter les CSR en tant que matériaux destinés à des applications dans le bâtiment [5][6]. Cette étude explore l'intégration des CSR dans la production de panneaux d'isolation thermique. Une telle approche permet non

seulement de répondre aux défis de gestion des déchets, mais aussi de réduire l'empreinte carbone du secteur du bâtiment. Pour ce faire, il était important de mieux comprendre cette matière première en étudiant son processus de création et en caractérisant ses propriétés thermophysiques. De plus, une analyse de cycle de vie (ACV) a été réalisée pour la phase de production des CSR, en se basant sur des informations fournies par échange avec Eco-maison¹ et lors d'une visite effectuée avec eux dans un site de valorisation de déchets de Véolia. La composition des CSR est demeurée globalement stable depuis le début de leur production selon Véolia. Les éventuelles variations observées ont été jugées mineures et négligeables. Cette stabilité est notamment attribuée au fait qu'un changement significatif nécessiterait une transformation en amont dans la fabrication des meubles, laquelle ne pourrait se répercuter qu'à long terme, après que les produits concernés aient été utilisés par les consommateurs et atteignent leur fin de vie.

2. Matériaux et Méthodes

2.1. Préparation des échantillons de CSR

La préparation des échantillons de CSR a présenté des défis en raison de la nature très hétérogène du matériau. Le CSR est un mélange de composants de tailles et formes très différentes qui ont tendance à se ségréger pendant la manipulation et le stockage. Cela peut entraîner des incohérences dans la représentation des échantillons et des tests.

Pour surmonter ce problème, la méthode de **quartage recommandée par le RILEM** (Fig. 1) a été appliquée afin de garantir un échantillonnage représentatif du CSR. La méthode de quartage vise à minimiser la ségrégation des particules en divisant et mélangeant systématiquement le matériau pour obtenir des échantillons représentatifs [7][8].

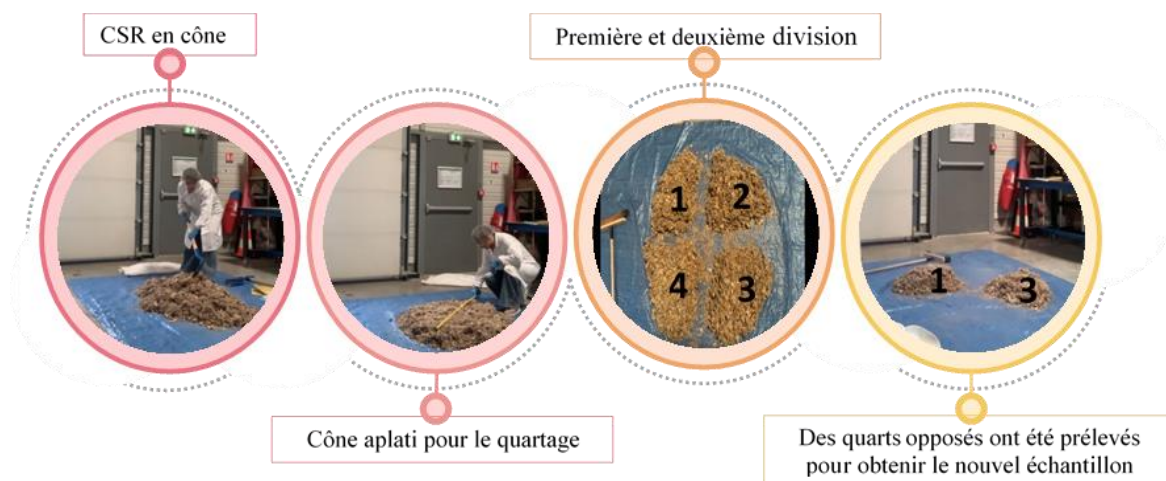


Figure 1 : Les étapes de quartage en suivant la recommandation de la RILEM

Les échantillons de CSR quartés ont été séchés dans une étuve ventilée à 60 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (variation inférieure à 0,1 % entre deux pesées successives espacées de 24 heures). Cette procédure a été réalisée conformément aux recommandations d'Amziane *et al.* (2017), comme une étape préalable aux expériences de caractérisation physique [7][8][9].

2.2. Caractéristiques physiques

Du fait de l'hétérogénéité du CSR, il est essentiel de caractériser sa distribution granulaire. Cette donnée permet d'optimiser l'homogénéité des échantillons au global et la performance des matériaux issus de ce résidu hétérogène.

2.2.1. Analyse granulaire

La distribution granulaire a été déterminée de manière préliminaire par tamisage, avec une adaptation des normes NF EN 933-2 et des recommandations du RILEM. Le tamisage a été réalisé sur des échantillons de 30g à l'aide de 7 tamis de 200 mm de diamètre avec des ouvertures de mailles de 0,315, 1,25, 2,5, 5, 16, et 20 mm ; un tamisage mécanique vertical a été effectué pendant 10 minutes avec une amplitude maximale de vibration de 3 mm/g.

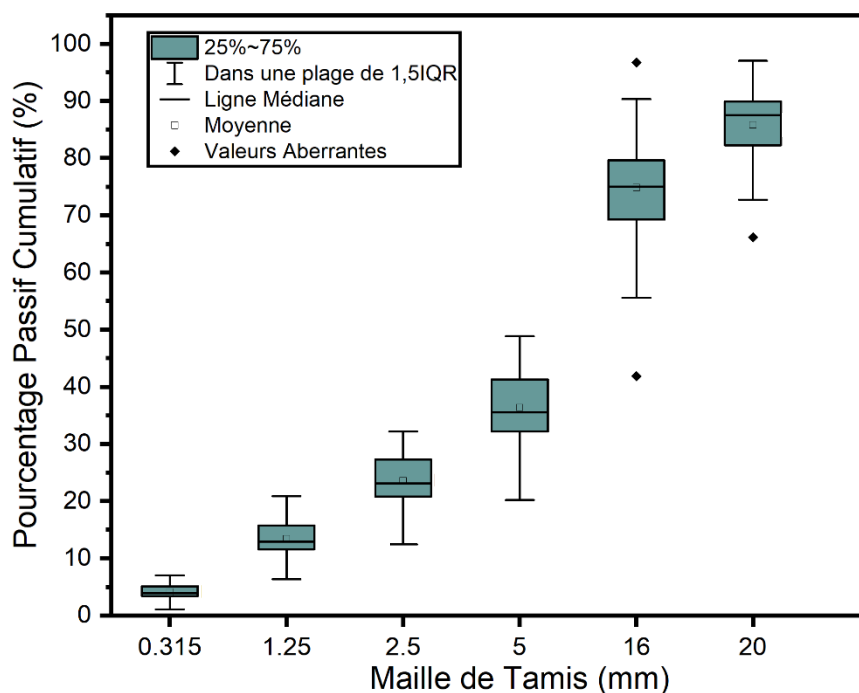


Figure 2 : Tracé des distributions cumulées à partir des échantillons analysés de 30 g de CSR.

L'analyse granulaire par tamisage montre (Fig.2) que les particules fines ($<0,315$ mm), représentent une très faible proportion (4% en masse). Les particules de grande taille, c'est-à-dire celles supérieures à 16 mm (incluant celles de 20mm), représentent environ 25% en masse de l'échantillon total. Par ailleurs, près de 70% de la masse de l'échantillon est constituée de fibres et de particules (réparties entre 0,315 et 16 mm). Ces particules, souvent sous formes variées, sont majoritairement allongées et non circulaires, ce qui limite l'efficacité de cette méthode. En effet, dans cette méthode, les particules passent à travers les ouvertures de mailles par leur direction longitudinale, ce qui biaise l'interprétation de leur distribution réelle. Conformément aux recommandations du RILEM, il est donc nécessaire de combiner cette méthode avec une méthode d'analyse d'image afin d'obtenir une caractérisation granulaire complète et représentative des particules de CSR [9][7]. Cette méthode, actuellement en cours de réalisation, permettra de compléter les données issues du tamisage en analysant des particules (axes majeurs et mineurs, circularités, aires, diamètre équivalent surface (DES), élongation).

2.3. Caractéristiques thermiques

2.3.1. Méthode Hot Disk

Pour évaluer la conductivité thermique des CSR, la méthode du Hot-Disk a été utilisée. Le principe de la méthode est décrit dans la référence [10]. Des mesures ont été réalisées en utilisant une sonde en Kapton modèle 5599 de rayon 29,40 mm. Une puissance de chauffe de 132 mW est appliquée pendant 1280 secondes. Ces tests ont été effectués sur des échantillons

de CSR à différentes densités, afin d'étudier l'effet de la densité sur la conductivité thermique. Quatre prélèvements distincts d'échantillons de CSR ont été testés. Un dispositif a été conçu au laboratoire pour mesurer les propriétés thermiques à différentes masses volumiques (de 89 à 266 kg/m³) (Fig. 3).



Figure 3 : Positionnement de la sonde entre les deux couches de CSR

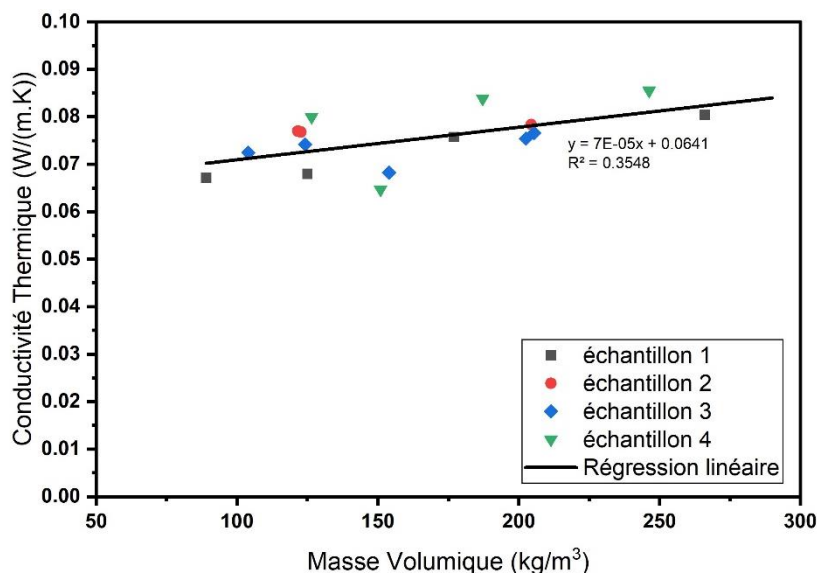


Figure 4 : Conductivité thermique du CSR en vrac en fonction de la masse volumique

Les valeurs de conductivité thermique obtenues (Fig. 4) sont inférieures à 0,1 W/(m.K) et se situent toujours entre 0,06 et 0,08 W/(m.K) ce qui positionne le CSR comme un bon isolant thermique, notamment si l'on considère que le matériau caractérisé dans cette étude est la ressource « brute » issue d'un centre de valorisation de déchets. Sa conductivité thermique est comparable à d'autres isolants comme la laine de bois (350-600 kg/m³) et les fibres de bois (30-270 kg/m³) (Fig. 5) [11]. Ces déchets pourraient ainsi être utilisés par la suite pour le développement de panneaux d'isolation. Cependant, la régression linéaire montre une dispersion des résultats due à l'hétérogénéité intrinsèque du matériau. Les variations inhérentes aux échantillons prélevés soulignent la nécessité de prendre davantage de mesures pour affiner les résultats. Il serait également pertinent de réaliser des tests à plus grande échelle afin d'améliorer la représentativité des propriétés thermiques du matériau.

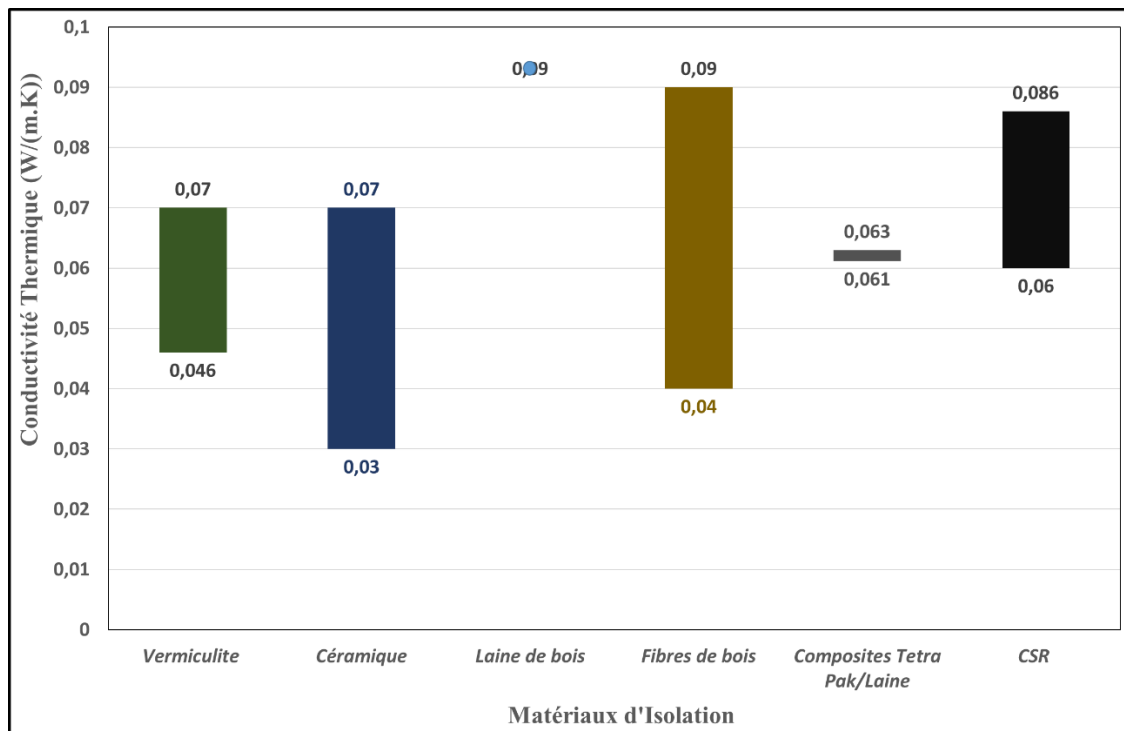


Figure 5 : Comparaison de la conductivité thermique du CSR avec d'autres matériaux d'isolation

2.4. Analyse de cycle de vie (ACV)

L'analyse du cycle de vie (ACV) joue un rôle fondamental dans l'évaluation de l'impact environnemental des matériaux, en particulier lorsqu'il s'agit de nouveaux matériaux tels que les isolants à base de CSR. L'ACV permet de quantifier les charges environnementales sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit, aidant ainsi à prendre des décisions éclairées. Dans cette étude, la méthode **ACV attributionnelle** a été adoptée, en utilisant la plateforme **BrightwayLCA** [12] et la base de données **ecoinvent 3,4 cut-off**. La norme **EN 15804** [13], dédiée à l'ACV dans le secteur du bâtiment, a été suivie.

2.4.1. Hypothèses formulées :

1. Définition des limites du système :

- L'analyse débute au moment où les éléments d'ameublement en fin de vie sont jetés dans les déchetteries, hôpitaux ou hôtels, et inclut leur transport vers les éco-organismes pour tri et valorisation. Ainsi, les étapes en amont (fabrication des meubles) ne sont pas prises en compte.
- L'analyse se termine au moment où les CSR sont mis à disposition pour une nouvelle application. Ainsi, les étapes en aval (production et fin de vie des panneaux isolants à base de CSR) ne sont pas prises en compte dans cette première étude. Lorsqu'une formulation aura été identifiée pour les panneaux isolants à base de CSR, les étapes en aval seront ajoutées à l'ACV.

2. Utilisation de données spécifiques :

L'analyse repose sur des données collectées auprès d'un éco-organisme en France, détaillant les étapes de traitement des DEA ainsi que les distances parcourues par les camions pour le transport de déchets.

2.4.2. Explication du schéma du processus de production de CSR :

Le schéma présenté en figure 6 décrit le processus de transformation des DEA en CSR. Les DEA collectés depuis des déchetteries, hôpitaux et hôtels sont transportés vers un centre de tri où ils subissent un contrôle qualité et une série de traitements mécaniques (broyage, tri et criblage). Les matériaux valorisables comme le bois et les métaux sont séparés, tandis que les résidus restants non dangereux et non recyclables sont transformés en CSR. Ensuite, les CSR sont préparés aux frais de l'éco-organisme pour être expédiés dans d'autres pays où ils sont valorisés énergétiquement, notamment par incinération dans des cimenteries. Ce processus engendre des coûts élevés et s'éloigne des objectifs de l'économie circulaire.

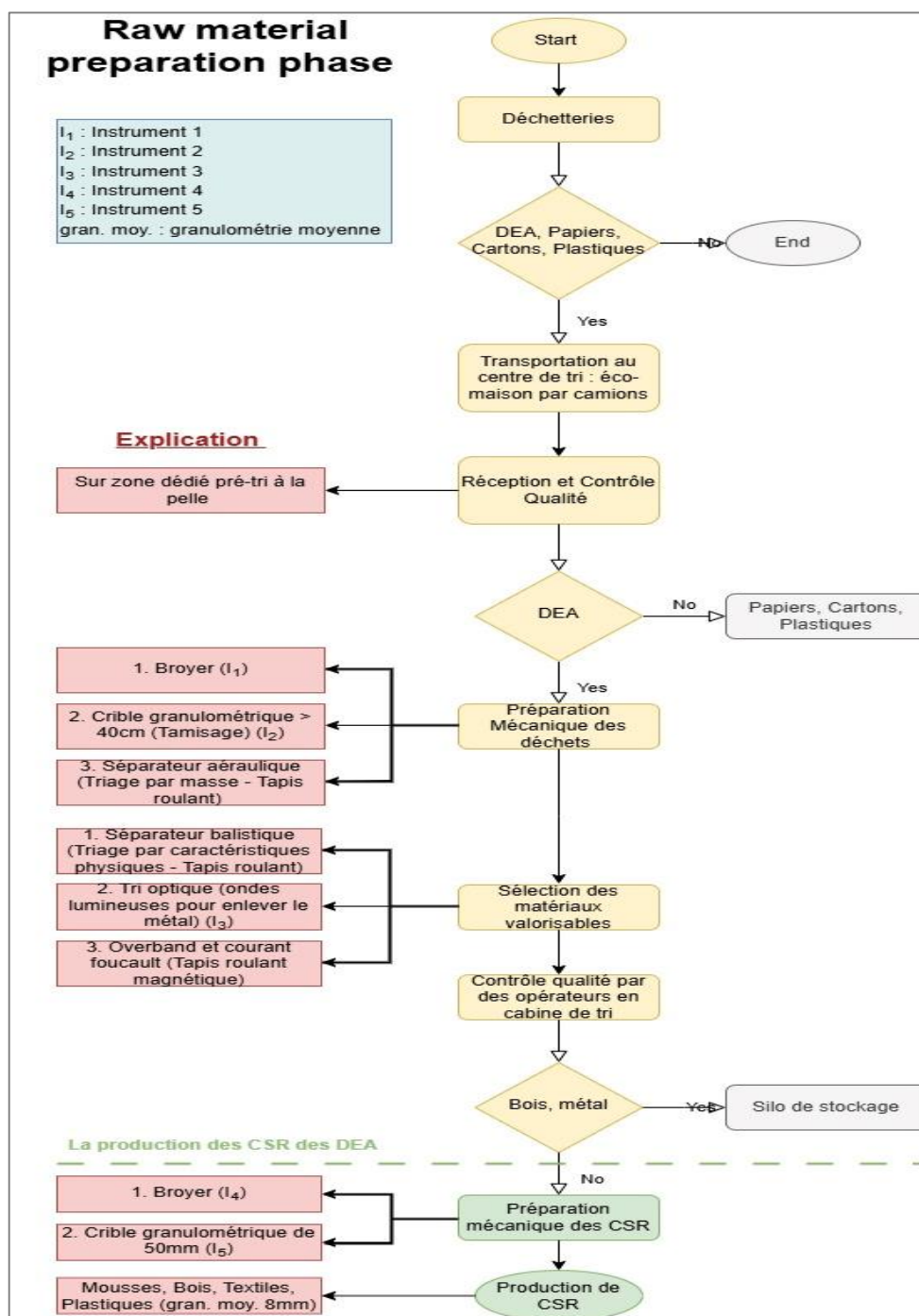


Figure 6 : Schéma explicatif des étapes de production de CSR

2.4.3. Interprétation des résultats de l'ACV :

Les résultats de l'ACV mettent en évidence une performance environnementale notable des CSR en comparaison avec les fibres de cellulose (Fig. 7). Cette comparaison repose sur l'hypothèse que les CSR bruts pourraient être utilisés directement comme matériau isolant, tout comme les fibres de cellulose le sont actuellement. Idéalement, une comparaison devrait être réalisée entre deux panneaux d'isolants : l'un à base de CSR et l'autre issu d'un matériau traditionnellement utilisé dans les bâtiments. Les résultats présentés sur la figure 7 concernent le changement climatique. Les résultats sont similaires pour tous les autres indicateurs environnementaux de la norme EN 15 804, qui ont également été calculés, mais n'ont pas été affichés par manque de place. Selon les indicateurs, les impacts des CSR sont 15 à 50 fois plus faibles que ceux de la fibre de cellulose.

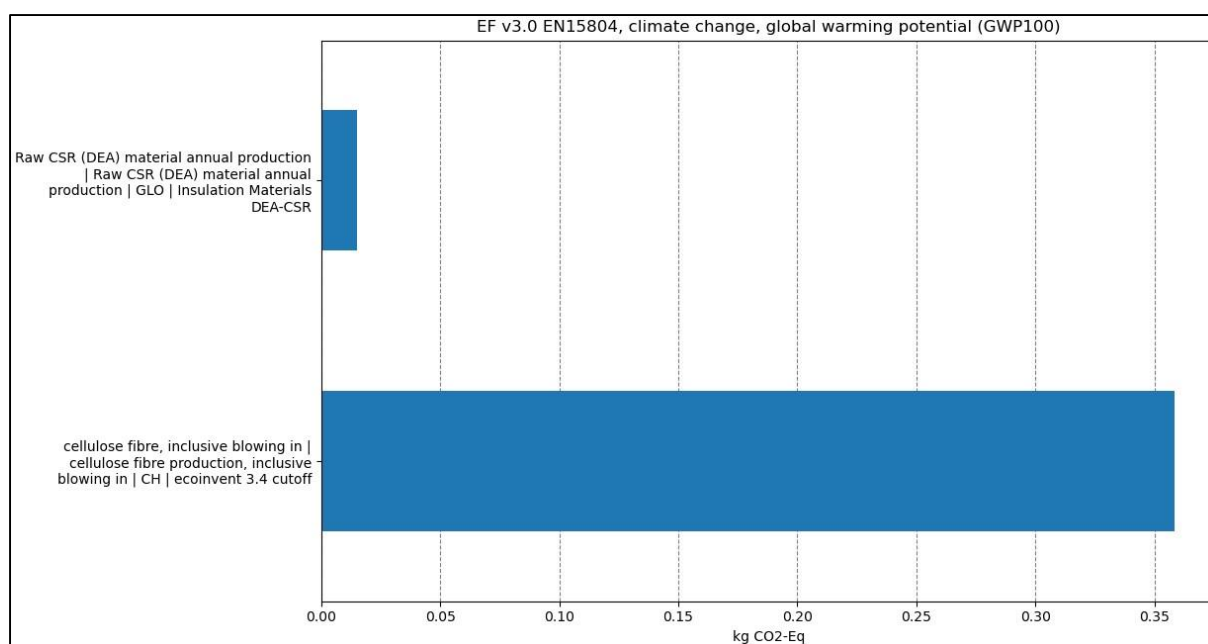


Figure 7 : L'impact environnemental de la production de CSR pour l'indicateur de Potentiel de réchauffement global (GWP 100) de la norme EN 15 804, en kg CO₂-Eq.

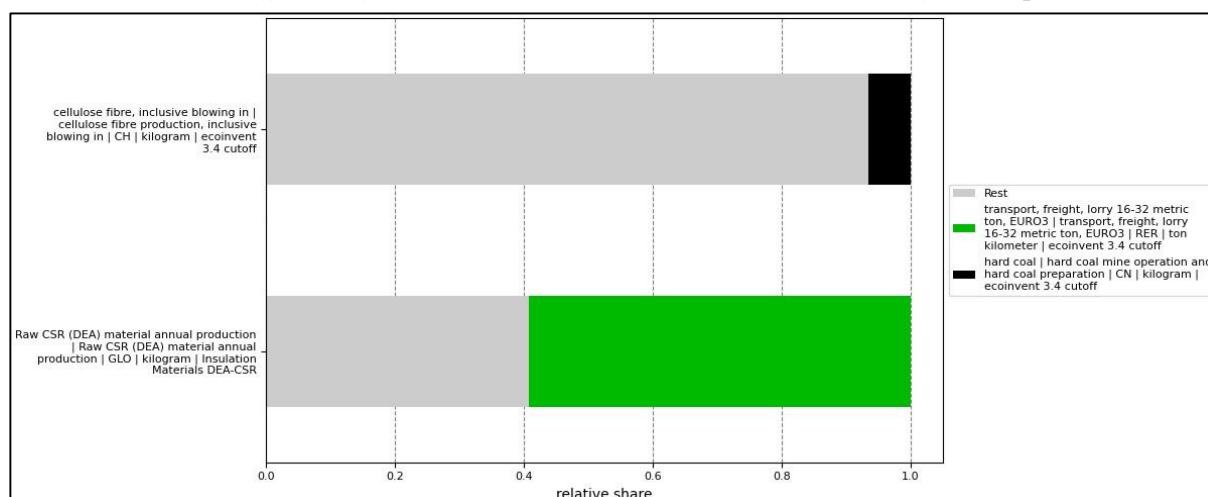


Figure 8 : L'impact du transport sur l'ACV de la production de CSR

Dans cette analyse, l'impact du transport des CSR est significatif (Fig.8), principalement en raison de l'hypothèse de véhicules (EURO3) et des distances parcourues par ces véhicules pour transporter les DEA aux éco-organismes. Nous avons pris le scénario le plus défavorable afin d'évaluer un cas extrême. Par ailleurs, il est important de noter que, dans la production des

CSR, l'électricité utilisée provient principalement du nucléaire (mix électrique français), ce qui influence favorablement l'empreinte carbone.

3. Conclusion

Cette étude met en évidence le potentiel d'intégration des Combustibles Solides de Récupération (CSR), issus des déchets d'éléments d'ameublement, dans des matériaux d'isolation thermique pour le bâtiment. Grâce à une caractérisation des propriétés physiques et thermiques, nous avons démontré l'impact de l'hétérogénéité et de la densité des CSR sur leur conductivité thermique. L'analyse de cycle de vie (ACV) a par ailleurs confirmé les avantages environnementaux des CSR, révélant un impact réduit par rapport aux alternatives conventionnelles (comparaison avec le Cellulose en vrac).

Les travaux futurs porteront sur la production reproductible en laboratoire de panneaux d'isolation à base de CSR et leur ACV.

Remerciements

Les auteurs remercient le Campus des Métiers et Qualifications « Transition Numérique et Ecologique dans la Construction » pour le financement de la thèse et l'organisme Eco-Maison pour le soutien apporté à ces travaux.

Références

- [1] Ministère de la Transition Écologique, « La loi anti-gaspillage dans le quotidien des Français : Concrètement, ça donne quoi ? », Ministère de la Transition Écologique, Paris, France, sept. 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Document_LoiAntiGaspillage
- [2] Eco-maison et Veolia, « Internal Reports on CSR Specifications », Paris, France, 2024.
- [3] Au-Dev-ant, M. Travieux, et C. HOUDUS, « Éléments d'Ameublement : données 2021 - Rapport annuel », ADEME, 18MAR00046, sept. 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://bibliothèque.ademe.fr/>
- [4] Ministère de l'Écologie et de la Cohésion des Territoires, « Loi 2010-788 : Éléments d'ameublement (DEA) - Ministère de l'Écologie et de la Cohésion des Territoires », Ministère de l'Écologie et de la Cohésion des Territoires, Paris, France, nov. 2023.
- [5] « Why should we care about a building's energy consumption? », Atmospheric Sciences. Consulté le: 8 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://blogs.egu.eu/divisions/as/2015/09/08/why-should-we-care-about-the-building-energy-consumptions/>
- [6] « Le contexte français en matière de politique climatique et énergétique », Notre avenir énergétique se décide maintenant. Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://concertation-strategie-energie-climat.gouv.fr/le-contexte-francais-en-matiere-de-politique-climatique-et-energetique>
- [7] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, et M. Sonebi, « Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity », in *Materials and Structures*, vol. 50, 2017, p. 167. Consulté le: 25 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://link.springer.com/10.1617/s11527-017-1029-3>
- [8] S. Amziane et F. Collet, Éd., *Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM*, vol. 23. in RILEM State-of-the-Art Reports, vol. 23. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017. doi: 10.1007/978-94-024-1031-0.
- [9] H. H. Ratsimbazafy, « Évaluation du potentiel de co-produits agricoles locaux valorisables dans le domaine des matériaux de construction (PALOMAC) », Doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier., Toulouse, France., 2022.
- [10] O. Hamdaoui, L. Ibos, A. Mazioud, M. Safi, et O. Limam, « Thermophysical characterization of Posidonia Oceanica marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings », *Constr. Build. Mater.*, vol. 180, p. 68-76, août 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.195.
- [11] L. D. Hung Anh et Z. Pásztor, « An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials », *J. Build. Eng.*, vol. 44, p. 102604, déc. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102604.
- [12] C. Mutel, « Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment », *J. Open Source Softw.*, vol. 2, n° 12, p. 236, avr. 2017, doi: 10.21105/joss.00236.
- [13] European Committee for Standardization (CEN), *EN 15804+A2: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*, EN 15804+A2:2019, Brussels, Belgium., 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://standards.cen.eu/>