

Projet Wood2Wood : Décontamination et valorisation matériau du bois post-consommateur par couplage de procédés thermochimique et biologique.

GIUSTINIANI Coline¹, AYADI Melek¹, ANTOINE Marie-Laure¹², PERRIN Christelle¹, LALLEMAND Julien², BESSERER Arnaud¹, BROSSE Nicolas¹

¹Université de Lorraine, LERMAB, France

²ENSTIB, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Epinal, France

coline.giustiniani@univ-lorraine.fr

Mots clefs : explosion à la vapeur ; dépollution ; bois déchets ; mycocomposite ; biosorption

Contexte et objectifs

Le sujet de cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet européen Wood2Wood (Horizon Europe, GA n°101091801, <https://www.wood2wood-project.eu/>), dont l'objectif est de traiter et de réemployer les déchets bois issus principalement de la construction et de l'ameublement, afin de limiter le recours à des ressources vierges. Ce projet s'intègre pleinement dans les priorités européennes, en cohérence avec le plan d'action pour l'économie circulaire (Parlement Européen 2020), le plan d'action contre la pollution (European Commission 2021), la stratégie forestière de l'UE (European Commission 2021) et la directive-cadre sur les déchets (European Commission 2023). La revalorisation de cette biomasse s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire nécessaire pour diminuer l'impact carbone sur les forêts et limiter les effets sur le dérèglement climatique (Bozzolan et al 2024, Forster et al 2023, Nguyen, 2023).

Cependant, les gisements de bois post-consommateur présentent une grande hétérogénéité. Ils peuvent contenir des adhésifs, des revêtements ou encore des agents de préservation, dont certains sont particulièrement nocifs (United Nations Economic Commission for Europe 2023 ; USEPA, 2018). Chaque gisement étant de composition différente, il est nécessaire de mettre en œuvre des stratégies de décontamination efficaces, capables de pallier cette hétérogénéité (Altgen et al 2025).

Les cadres réglementaires actuels, comme la classification CODIFAB/FCBA, distinguent trois grandes catégories de bois post-consommateur : la classe A (bois non traités), la classe BR1 (bois revêtus ou collés), la classe BR2 (bois revêtus ou collés) et la classe C (bois imprégnés de biocides ou de peintures à métaux lourds). Cette typologie souligne la diversité des flux, mais aussi les verrous liés à leur recyclage.

Parmi les procédés émergents, l'explosion vapeur — historiquement utilisée pour le prétraitement des biomasses lignocellulosiques (Brownell et Saddler 1987) — montre une capacité remarquable à dépolymériser les colles urée-formol, réduisant la teneur en formaldéhyde jusqu'à 80 % (Troilo et al 2023). En complément, des études récentes ont démontré le potentiel de champignons ligninolytiques, capables de tolérer et de dégrader différents contaminants (formaldéhyde, cuivre, azoles) grâce à une combinaison de mécanismes : biosorption, efflux, oxydation enzymatique, voire dégradation extracellulaire (Pandharikar et al 2022, Vandekerckhove et al 2025).

Ces approches de couplage de procédés thermochimiques et biologiques représentent un levier prometteur, ouvrant la voie à une stratégie hybride de décontamination et de valorisation. Cette

thèse vise à étudier et à évaluer l'efficacité de ces procédés innovants, tout en analysant les voies de valorisation de cette biomasse dépolluée.

Matériels et méthodes

Matériau bois

Le bois utilisé provient d'un gisement BR1 d'Ecomaison. Il est composé de panneaux de particules, de bois avec ou sans revêtement et de panneaux MDF (Fig. 1). Les essences de résineux sont majoritaires.



Fig. 1 : Exemple de biomasses présentes dans le gisement BR1 fourni par Ecomaison

Méthodes

Le pilote d'explosion vapeur utilisé dans le cadre de cette thèse est illustré Fig. 2 et Fig. 3. Les conditions d'explosion sont réglables. Les paramètres variables sont le couple pression température, le temps de séjour, la quantité de biomasse en entrée ainsi que l'ajout éventuel d'eau.



Fig. 2 : Pilote d'explosion vapeur, situé au Campus Bois à Epinal

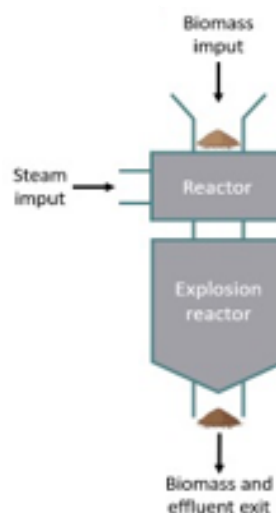


Fig. 3 : Schéma simplifié du pilote d'explosion vapeur

Les méthodes d'analyses utilisées pour quantifier l'élimination de la colle sont la FTIR et la microscopie à fluorescence (Grigsby et Warren 2003).

Les cultures liquides sont réalisées à partir de spores d'une souche du genre *Trichoderma*. Elle est ajoutée à un milieu de culture contenant des extraits de levures (YE) et du formaldéhyde (CH_2O), puis placé dans un agitateur incubateur à 28°C. La décontamination du formaldéhyde et la croissance du champignon sont évaluées durant une semaine de culture avec des prélèvements quotidiens. Les dosages de CH_2O sont effectués via un couplage HPLC et HPTLC (High-performance thin-layer chromatography). La croissance fongique est quantifiée par la masse sèche. La Fig. 4 schématise ces différentes étapes. La viabilité de la souche est observée en microscopie à fluorescence (Chen et Séguin-Swartz, 2002) avec le kit LIVE/DEAD (ThermoScientific, Etat-Unis).

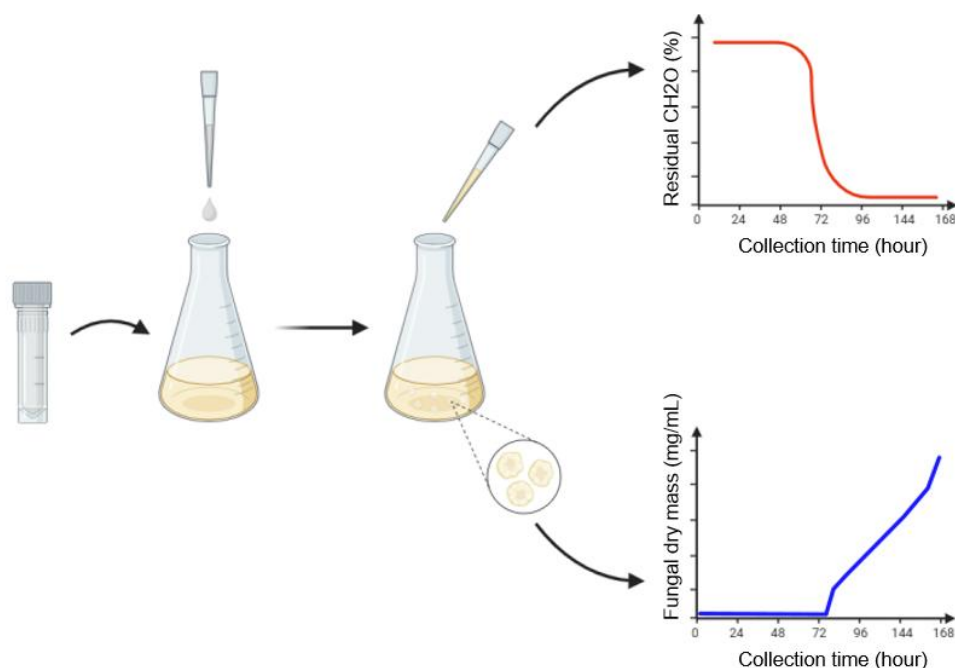


Fig. 4 : Schéma des étapes de mise en œuvre de la culture liquide

Résultats et discussions

Des explosions ont été réalisées avec des panneaux de particules, du MDF et en mélange, avec et sans ajout d'eau (Fig. 5). Les pressions d'explosions varient entre 8,5-16 bar et ont permis un fractionnement de la matière, ainsi qu'un défibrage plus ou moins important en fonction de la sévérité des conditions (Fig. 6). Les observations en microscopie à fluorescence indiquent que le procédé permet, dans toutes les conditions testées, une élimination quasi complète de la colle, avec seulement quelques résidus localisés.



Fig. 5 : Panneaux de particules coupés au ciseau à bois



Fig. 6 : Particules de panneaux après explosion vapeur à 185°C-12 bar pendant 10 min

Les adhésifs, composés principalement d'urée-formol, se retrouvent dans les effluents à la suite du procédé d'explosion vapeur. La bioremédiation est alors mise en œuvre afin d'éliminer le formaldéhyde et ses dérivés, car dangereux pour l'être humain et son environnement. Une solution standardisée est utilisée pour la culture, afin d'acclimater notre souche du genre *Trichoderma* et d'étudier sa tolérance au CH_2O . Différents milieux de cultures sont étudiés permettant la caractérisation de notre souche. Lorsque les milieux contiennent des extraits de levures, le champignon ne sporule pas. Le traitement des effluents est alors simplifié, car l'alimentation progressive permet d'enchaîner les cycles de décontamination sans arrêter le système. Le suivi de décontamination est observé par HPTLC (Fig. 7). Après trois jours de culture, la concentration de formaldéhyde diminue en moyenne d'environ 48 %. La souche est donc tolérante au formaldéhyde et est capable de le dégrader. Le milieu optimal de croissance retenu est l'extrait de levures.

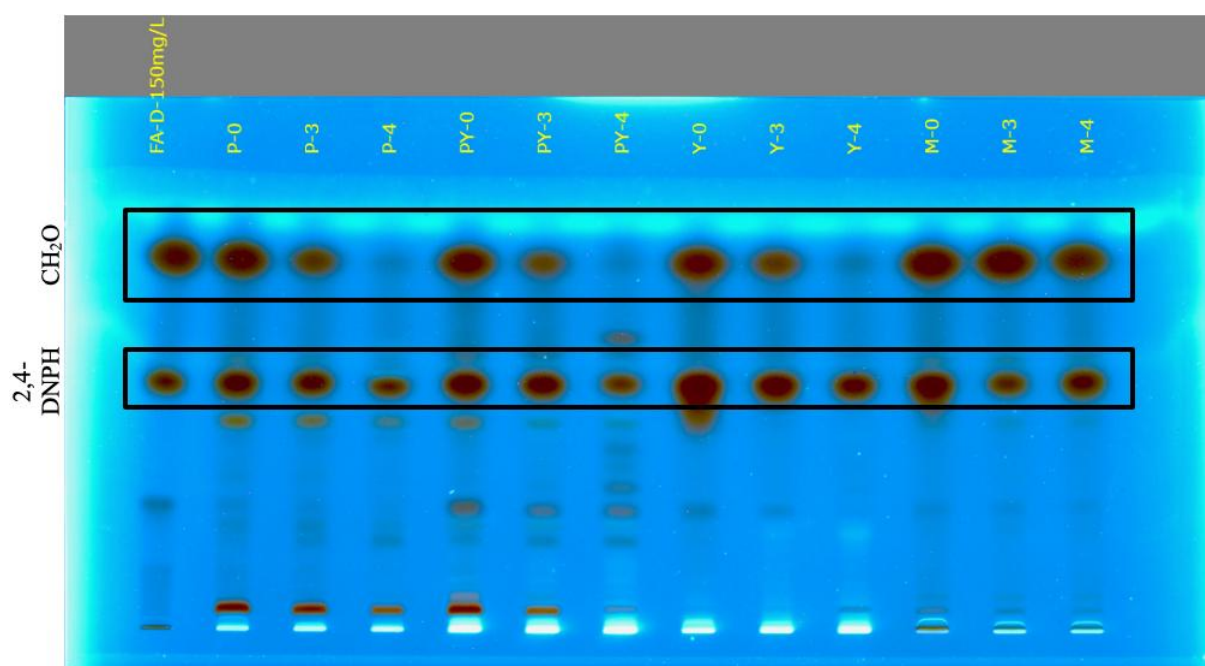


Fig. 7 : Analyse HPTLC à 366 nm de différents milieux de culture (Potato Dextrose Broth [P], Yeast Extract [Y], Malt [M]) aux jours 0, 3 et 4, sur plaque de silice. La condition contrôle contient du formaldéhyde (FA). Concentration initiale en formaldéhyde à j0 : 600 mg/L.

Conclusion et perspectives

L'explosion vapeur permet une élimination quasi complète des colles urée-formol, tandis que la souche de *Trichoderma* testée dégrade efficacement le formaldéhyde en milieu modèle. Les prochaines étapes viseront à élucider les mécanismes de dégradation, à acclimater la souche aux effluents réels et à valoriser la biomasse dépolluée en nouveaux matériaux biosourcés.

Remerciements

Financé par l'Union européenne. Les opinions exprimées n'engagent que leur(s) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement celles de l'Union européenne ou de l'HADEA. Ni l'Union européenne ni l'autorité subventionnaire ne peuvent en être tenues responsables.

Références

- Altgen M, Gedde K.B, Ross L, Larnøy E (2025) Physical and chemical characterization of post-consumer wood chips for recycling. *Waste Manag.* 200, 114762. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114762>
- Bozzolan N, Grassi G, Mohren F, Nabuurs G (2024) Options to improve the carbon balance of the harvested wood products sector in four EU countries. *GCB Bioenergy* 16, e13104. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13104>
- Brownell HH, Saddler JN (1987) Steam pretreatment of lignocellulosic material for enhanced enzymatic hydrolysis. *Biotechnology and Bioengineering*, 29(2), 228-235. <https://doi.org/10.1002/bit.260290213>
- Chen CY, Séguin-Swartz G (2002) A rapid method for assessing the viability of fungal spores1. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 24(2), 230-232. <https://doi.org/10.1080/07060660309507000>
- CODIFAB 2022. Référentiel de classification des déchets bois. CODIFAB.
- European Commission (2018) Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE).
- European Commission (2021) EU Action Plan: "Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil". Publications Office, Brussels.
- European Commission (2021. New EU Forest Strategy for 2030. Brussels.
- European Commission (2023) Waste Framework Directive.
- Forster E. J, Healey J. R, Newman G, Styles D (2023) Circular wood use can accelerate global decarbonisation but requires cross-sectoral coordination. *Nature Communications*, 14(1), 6766. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42499-6>
- Grigsby WJ, Thumm A, Kamke FA (2005) Determination of resin distribution and coverage in MDF by fiber staining. *Wood and Fiber Science*, 37(2), 258–269.
- Nguyen T (2023) Climate effects of post-use wood materials from the building sector in a system perspective. *Waste Management*, 170, 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.011>
- Pandharikar G, Claudien K, Rose C, Billet D, Pollier B, Deveau A, Besserer A, Morel-Rouhier M (2022) Comparative Copper Resistance Strategies of *Rhodonia placenta* and *Phanerochaete chrysosporium* in a Copper/Azole-Treated Wood Microcosm. *Journal of Fungi*, 8(7), 706. <https://doi.org/10.3390/jof8070706>
- Parlement Européen (2020) Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions : Un nouveau plan d'action pour une économie circulaire. Pour une Europe plus propre et plus compétitive.
- Troilo S, Besserer A, Rose C, Saker S, Soufflet L, Brosse N. (2023). Urea-Formaldehyde Resin Removal in Medium-Density Fiberboards by Steam Explosion: Developing Nondestructive Analytical Tools. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 11(9), 3603-3610. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05686>

United Nations Economic Commission for Europe (2023) Catalogue of Wood Waste Classifications in the UNECE Region, Geneva Timber and Forest Discussion Papers. United Nations. <https://doi.org/10.18356/9789210021340>

USEPA, Office of Research and Development (2018) Wood Waste Inventory Final Report. National Risk Management Research Laboratory, Materials Management Division.

Vandekerkhove C, Bchini R, Dhalleine T, Kohler A, Deveau A, Pandharikar G, Besserer A, Sormani R, Darnet S, Morel-Rouhier M (2025) Dissecting the mechanisms of copper-azole wood preservatives detoxification by ligninolytic fungi. Journal of Hazardous Materials, 486, 136934. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136934>