

Des défis souterrains pour des solutions bas carbone : Analyse du cycle de vie des mortiers pour une construction durable et visionnaire

Somaya RIFFI¹, Elhem GHORBEL¹, Franziska SCHMIDT², Filippo CUCCAGNA³, Mohamed NOUALI⁴

¹ CY Cergy Paris Université – 5 Mail Gay Lussac – Neuville sur Oise- 95031 Cergy Paris Université – France.

² MAST/EMGCU, Marne-la-Vallée Université Gustave Eiffel – France

³ TRACTEBEL ENGINEERING S.A. Business Area Infrastructures Europe- Direction Urban France et Monaco - Unité Urban - No 7, rue Emmy Noether, 93400 Saint Ouen – France

⁴ ESTP Paris - 28 Av. du Président Wilson, 94230 Cachan, France

RESUME La nécessité croissante pour l'industrie de la construction de développer des solutions innovantes intégrant des pratiques éco-responsables et favorisant un usage durable des matériaux, exige une analyse complète de leur cycle de vie et de ne plus se limiter au bilan carbone. Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs conduits en évidence le potentiel des marins issus des travaux tunneliers de Grand Paris Express pour la fabrication de mortiers thermiquement isolants destinés aux panneaux muraux. L'étude a montré qu'une formulation à base de marins tunneliers enrichis par 0.8% de fibres de chanvre, 2% de tannin et 5% de ciment représentait une solution optimale en termes de propriétés mécaniques, thermiques et hydriques. S'appuyant sur ces résultats, ce travail vise à effectuer une analyse du cycle de vie (ACV) de ces matériaux, de l'extraction jusqu'à la phase de production des mortiers isolants afin d'évaluer les impacts environnementaux, notamment le potentiel de réchauffement climatique, l'énergie incorporée, l'efficacité des ressources et les avantages environnementaux potentiels. En comparant ces mortiers biosourcés à des matériaux conventionnels à base de plâtre. Cette étude démontre la faisabilité de transformer les marins tunneliers en matériaux performants et à faible impact environnemental. Par ailleurs, elle établit une stratégie claire pour valoriser les déchets au sein de pratiques de construction durables, en promouvant des approches innovantes vers la neutralité carbone.

Mots-clés Marins tunneliers, Panneaux muraux, Analyse cycle de vie (ACV), Construction durable, Economie circulaire

I. INTRODUCTION

Depuis les constructions d'argile de l'Antiquité jusqu'aux gratte-ciels modernes, les matériaux de construction n'ont cessé d'évoluer, influençant le progrès de la société tout en façonnant son rapport à l'environnement. Aujourd'hui, le secteur de la construction, bien qu'indispensable, est devenu l'un des principaux responsables de la dégradation environnementale. En 2022, selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP), ce secteur représentait près de 10 gigatonnes de CO₂, soit 37 % des émissions mondiales liées à l'énergie et aux processus opérationnels. Cette réalité souligne l'urgence de transformer le secteur pour atteindre une vision

des bâtiments à zéro émission, efficace et résilient d'ici à 2050 (AIE, 2021). Parmi les matériaux de construction les plus utilisés, le ciment se distingue comme l'une des principales sources de CO₂ d'origine industrielle, contribuant à environ 7–8 % des émissions globales en 2023 (Global Carbon Project, 2023). Ce matériau, bien que révolutionnaire à son époque, est aujourd'hui remis en question à cause de son impact environnemental élevé, notamment son potentiel de réchauffement climatique (GWP). Pour atténuer ces effets, la recherche s'oriente vers des solutions innovantes, comme l'utilisation de matériaux alternatifs et la valorisation des ressources locales.

Les terres excavées, souvent considérées comme des déchets issus de projets d'infrastructure, représentent une opportunité unique pour repenser les pratiques de construction. Par exemple, les déblais générés par le Grand Paris Express, estimés à 47 millions de tonnes (SGP, 2022), offrent un potentiel énorme pour créer des matériaux durables. Parmi les matériaux explorés, les fibres végétales, telles que le chanvre et le lin, combinées à des marins tunneliers, se démarquent par leurs propriétés mécaniques et thermiques intéressantes. L'étude de Lagouin et al. (2021) a montré que l'ajout de fibres de lin dans des mortiers terreux permet d'augmenter la résistance mécanique tout en limitant l'apparition de fissures, grâce à une meilleure adhésion fibre-matrice et un comportement optimisé à l'état durci. Ces renforcements mécaniques contribuent également à la durabilité des matériaux, en particulier à l'État Limite de Service (ELS), en contrôlant les phénomènes de fissuration et de retrait différé. De même, Rocha et al. (2023) ont mis en avant l'utilisation de mélanges terre crue et fibres naturelles dans les mortiers pour des procédés de fabrication additive, soulignant leur capacité à réduire la densité et à renforcer les performances thermiques. De plus, l'incorporation des fibres végétales dans les matériaux de construction favorise une réduction des émissions de CO₂ grâce à leur capacité de stockage de carbone pendant leur croissance (Boutin et al., 2006). Ces fibres, riches en cellulose et lignine, lorsqu'elles sont additionnées avec des matériaux tels que le tannin peuvent améliorer les performances mécaniques et thermiques des mortiers argileux. Le tannin est un polyphénol naturel qui représente la troisième classe la plus abondante de composants végétaux au monde, après la cellulose et la lignine (Hagerman et al., 1998). Principalement extrait du bois selon (Brás et al. 2024), le tannin est un biostabilisant utilisé soit comme un substitut d'eau dans les mélanges argile-sable, soit comme un revêtement de surface pour une protection supplémentaire contre l'humidité, ainsi qu'il contribue à améliorer la résistance à l'eau du matériau, en limitant l'absorption capillaire. Cependant, son impact environnemental reste peu exploré, en particulier au niveau de son cycle de vie complet. Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux de (Ghorbel et al. 2024), qui ont démontré que l'incorporation de 0.8% de fibres de chanvre et 2% de tannin, stabilisées avec 5% de ciment portland, dans des formulations de mortiers thermiquement isolants à base de marins tunneliers non traités, pourrait offrir un compromis idéal entre performances mécaniques, et hydro-thermiques. Cependant, ces études se concentraient principalement sur les propriétés des matériaux au niveau expérimental. Afin d'évaluer l'impact environnemental de cette formulation optimale trouvée, ce travail poursuit ces recherches en réalisant une ACV incluant l'évaluation du GWP, de l'extraction des matières premières jusqu'à la production des mortiers destinés aux panneaux muraux en comparant avec des plaques de plâtre et d'autres. Ces résultats permettront non seulement de confirmer la faisabilité de transformer des ressources inexploitées en matériaux performants, mais

aussi de fournir des recommandations pour promouvoir des pratiques de construction durables et respectueuses de l'environnement.

II. MATERIELS ET METHODES

A. Définition des objectifs et du champs de l'étude globale

L'évaluation environnementale présentée dans cette étude s'appuie sur les standards établis par les normes ISO 14040:2006 et ISO 14044:2006, ainsi que sur la norme européenne spécifique aux matériaux de construction EN 15804+A2:2019 et son complément national NF EN 15804/CN. Ces référentiels structurent l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) en quatre étapes essentielles schématisée en Figure 1, qui ont été rigoureusement suivies pour garantir la conformité méthodologique.

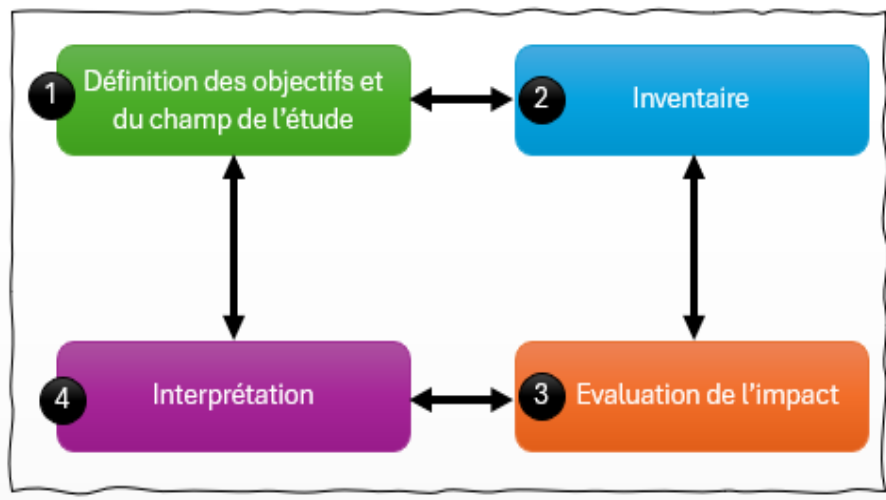


FIGURE 1. Phases du cadre méthodologique de l'ACV.

Les différentes formulations développées par Ghorbel et al. (2024) ont par ailleurs démontré de solides performances mécaniques conformes à la norme DIN 18947 (2018), thermiques et hydriques, grâce à leurs propriétés physico-chimiques (Tableau 1).

TABLEAU 1. Formulation massique optimisée du mortier isolant à base de marins tunneliers et performances associées à 28 jours.

Propriétés physiques des marins tunneliers	Couleur	Grise
	Odeur	Aucune
	Teneur en eau (%)	16
	Densité apparente (kg/m³)	2067
	Fraction fine (<0,63 mm)	27,3 %
Composition chimique des marins tunneliers	SiO₂ (%)	30,51
	Al₂O₃ (%)	3,72
	Fe₂O₃ (%)	2,17
	CaO (%)	17,4
	MgO (%)	5,64
	K₂O (%)	1,4
	SO₃ (%)	1,05
	Na₂O (%)	0,14
Composition optimale du mortier (% en poids)	Marins tunneliers	66,8 %
	Ciment I 52.5 N	5%
	Eau totale	25%
	Superplastifiant	0,4 %
	Fibres de chanvre	0,8 %
	Tannin	2%
Résistance mécanique à 28 jours (MPa)	Résistance à la compression (DIN 18947 standard >0.5 MPa)	0,85
	Résistance à la flexion (DIN 18947 standard >0.2 MPa)	0,55
Propriétés hygrothermiques	Absorption d'eau par capillarité (kg/m²·s^{0.5})	1,38
	Conductivité thermique (W/mK)	0,46
	Capacité thermique volumique (MJ/m³·K)	1,39

Le champ de l'étude globale couvre l'ensemble des étapes nécessaires à la fabrication des mortiers isolants destinés à la production de panneaux muraux. Conformément à la norme NF EN 15804+A2, l'analyse inclut les phases A1 à A3, correspondant respectivement à l'extraction et la transformation des matières premières (phase A1), leur transport jusqu'au site de production (phase A2), ainsi que la fabrication des mortiers au laboratoire L2MGC (phase A3). Les frontières du système de premier plan, représentées à la Figure 2, ont été établies et modélisées par les auteurs conformément à l'approche « du berceau à la sortie d'usine ».

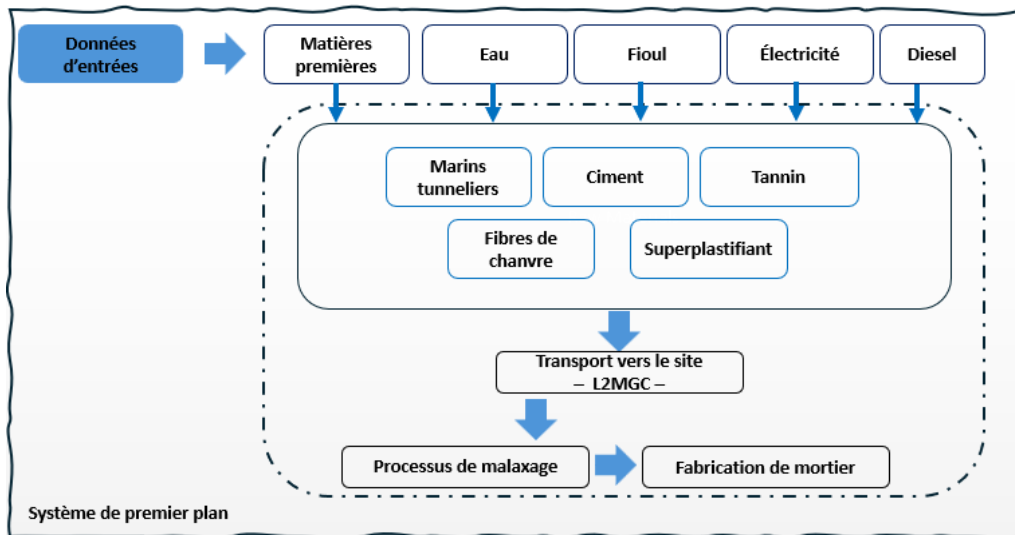


FIGURE 2. Frontières de l'ACV pour la fabrication d'1 kg de mortier (A1-A3).

Dans cette étude, l'unité fonctionnelle (UF) retenue est 1 kg de mortier destiné au panneau mural, adoptée pour sa simplicité et son adaptabilité à l'évaluation des impacts environnementaux de différentes formulations. L'utilisation d'une base massique permet une comparaison objective de la production des matériaux, en s'affranchissant des spécificités des matériaux, telles que leur résistance mécanique ou leurs propriétés thermiques tout en offrant une référence fiable pour interpréter et comparer les impacts environnementaux de manière claire et structurée.

B. Inventaire du cycle de vie

Les marins tunneliers utilisés dans cette étude proviennent de la ligne 16 du Grand Paris Express, l'un des plus grands projets d'infrastructure en Europe. Celui-ci prévoit la construction de 200 kilomètres de nouvelles lignes ferroviaires et génère environ 47 millions de tonnes de déblais. Les matériaux excavés, fournis par l'entreprise Tractebel Engie, sont classés comme une argile sableuse de type A-2-6, selon le système de classification des sols AASHTO.

- ⊙ Les fibres de chanvre utilisées présentent une longueur comprise entre 0,5 et 2,5 cm et une densité apparente de 105 kg/m³.
- ⊙ Le superplastifiant utilisé est le SIKA ViscoCrete TEMPO-9, tandis que le ciment employé correspond au CEM I 52.5 N CP2 NF.
- ⊙ Le tannin, quant à lui, provient du Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA) de Tarbes, France.

La modélisation du système a été réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 9.1.1.7, en s'appuyant sur la base de données Ecoinvent V3. Les marins tunneliers ont été modélisés selon une approche cut-off, en tant que déchets inertes, ce qui implique que seule leur phase de transport a été prise en compte dans l'analyse environnementale. La phase de transport a été modélisée à l'aide du processus « 1 tkm Transport, freight, lorry 7.5–16 metric ton, EURO6 {RER} », tandis que le malaxage des matériaux a été représenté par le processus « Electricity, medium voltage – {FR} ».

1. Le CEM I 52.5 N, fourni par Equiom (95). Sa modélisation repose sur l'entrée « Portland cement (CEM I), CEMBUREAU production mix, at plant – RER », qui reflète un mix technologique européen conforme à la norme EN 197-1.
2. La modélisation des fibres de chanvre s'appuie sur les données issues de la littérature (Isopescu et al., 2024), couvrant les principales étapes de leur cycle de vie : culture, récolte et transformation en chènevotte.
3. La modélisation du tannin repose sur les travaux de Barjoveanu et al. (2020), qui décrivent le processus d'extraction des polyphénols à partir de bois de pin en utilisant la méthode ReCiPe Midpoint H (2016).
4. En l'absence de données environnementales spécifiques dans les Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) pour le superplastifiant SIKA ViscoCrete TEMPO 9, ce dernier a été modélisé par analogie avec le TEMPO 10, pour lequel des données SIKA sont disponibles. Une majoration de 10 % du dosage a été appliquée afin de tenir compte des différences de formulation entre les deux produits.

Les distances de transport relatives à chaque intrant sont récapitulées dans le Tableau 2.

TABLEAU 2. Distances d'approvisionnement des matériaux utilisés.

Composants	Distance au L2MGC
Marins tunneliers	27
Ciment Portland	6.8
Fibres de chanvre	5
Superplastifiant	14.6
Tannin	853

C. Evaluation des impacts environnementaux

Dans cette analyse, la méthode d'évaluation des impacts retenue est : ReCiPe Midpoint H (2016) en raison de 1) ses larges catégories d'indicateurs environnementaux comparativement à d'autres méthodes (18 catégories d'impact) d'après (Morsali et al., 2017), 2) une comparaison entre les différentes méthodes appliquées aux matériaux de construction montre que celle-ci fournit des résultats plus réalistes (Hauschild et al., 2013). Les différentes catégories sélectionnées sont présentées dans le tableau 3.

TABLEAU 3. Les différentes catégories d'impacts évaluées.

Catégorie d'impact	Unité
Global warming	kg CO2 eq
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq
Ozone formation, Human health	kg NOx eq
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq
Terrestrial acidification	kg SO2 eq
Freshwater eutrophication	kg P eq

Marine eutrophication	kg N eq
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB
Land use	m ² a crop eq
Mineral resource scarcity	kg Cu eq
Fossil resource scarcity	kg oil eq
Water consumption	m ³

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette section analyse les résultats selon trois approches complémentaires. La première identifie le matériau ayant l'impact le plus élevé en termes d'émissions. La deuxième examine la contribution des matériaux au réchauffement climatique et à d'autres impacts environnementaux. Enfin, la troisième évalue les bénéfices environnementaux du panneau mural développé dans cette étude en comparant avec trois panneaux issus de la littérature.

A. Analyse comparative des impacts environnementaux des matériaux de base

La Figure 3 met en évidence la contribution des différents matériaux entrant dans la formulation du panneau développé, en termes d'impacts environnementaux. Bien que le CEM I ne représente que 5 % de la composition totale, sa production est associée à une émission moyenne de 0,911 kg de CO₂ eq par kilogramme de ciment, ce qui en fait un contributeur majeur au réchauffement climatique, à l'écotoxicité et à l'acidification terrestre (>75 %). Ces impacts élevés s'expliquent par un processus de fabrication énergivore, incluant la décarbonatation du calcaire et la consommation de combustibles fossiles.

Les fibres de chanvre, bien qu'issues de ressources renouvelables, contribuent de manière significative à certaines catégories spécifiques d'impact, notamment la consommation d'eau, l'eutrophisation marine et l'occupation des sols, avec une part dépassant 70 %. Selon le ministère de l'Agriculture et de la Pêche (2006), pour améliorer le bilan environnemental de chanvre, il faut optimiser la fertilisation azotée, réduire les distances de transport et donner un statut de co-produit à la poussière pour limiter l'impact global. D'un autre côté, le chanvre présente un effet bénéfique dans la catégorie de toxicité humaine non cancérogène, avec une contribution négative estimée à - 27 %, attribuée à sa composition naturelle et à l'absence de substances chimiques nocives, en contraste avec d'autres matériaux comme les adjuvants.

Enfin, bien que les superplastifiants soient présents en très faible proportion (0,4 %), ils affichent une contribution notable à la rareté des ressources fossiles, en raison de leur origine pétrochimique et des procédés industriels complexes impliqués dans leur production.

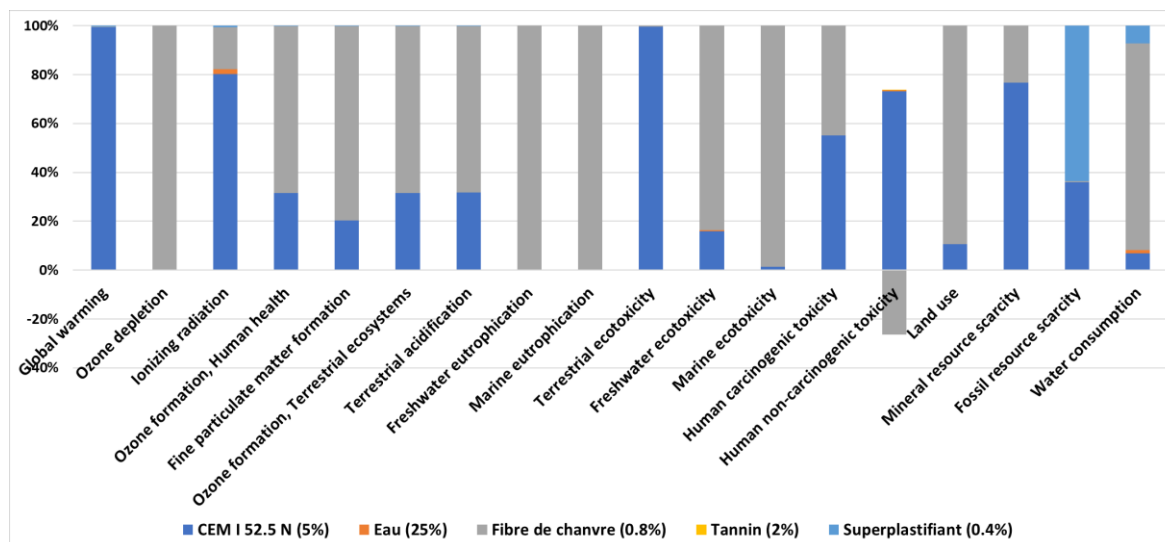


FIGURE 3. Analyse comparative des contributions environnementales des matériaux du panneau mural développé.

B. Analyse comparative des impacts environnementaux de production des panneaux muraux

La Figure 4 illustre la comparaison des impacts environnementaux de quatre types de panneaux muraux, en se limitant à la phase de production (A1 à A3), conformément aux frontières de système définies pour l'analyse. Afin d'assurer la cohérence des résultats, l'ensemble des cas a été évalué selon une même méthode de caractérisation, à savoir ReCiPe Midpoint (2016). Les scénarios comparés comprennent : un panneau composite à base de chanvre et de tannin développé dans le cadre de cette étude, un panneau de plâtre à base de laine de mouton, un biocomposite mural composé de 51% de résine bio-époxy Supersap et de 49% de fibres de lin, proposé par Quintana et al. (2020), ainsi qu'une plaque de plâtre conventionnelle issue des travaux de Morsali et al. (2024).

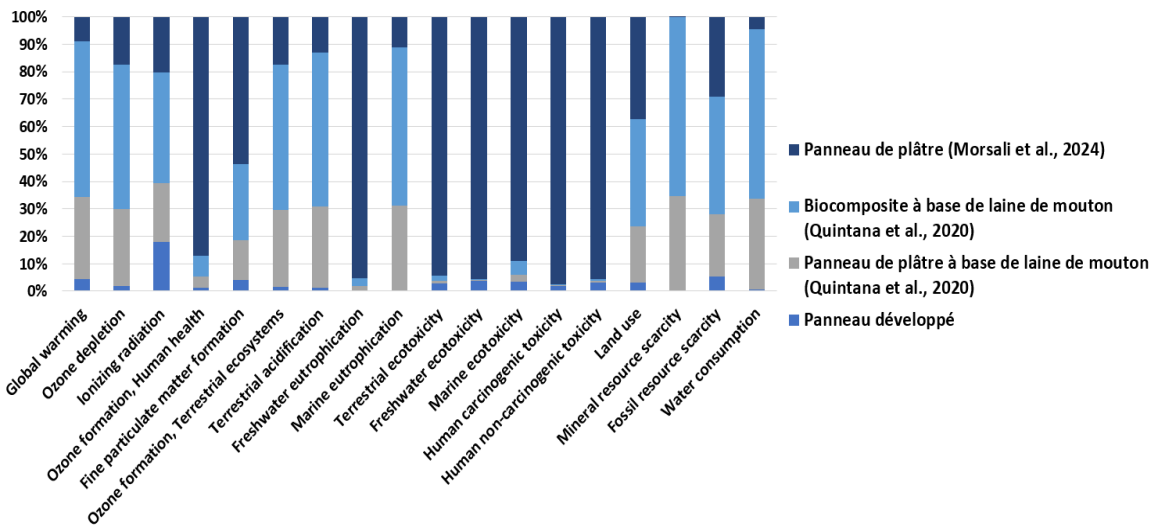
Les résultats montrent que les plaques de plâtre génèrent des impacts environnementaux significatifs, notamment en raison de l'extraction des matières premières, la production de gypse et d'additifs étant responsable de 92,43 % de la raréfaction des ressources minérales et de 91,59 % de l'eutrophisation marine. En revanche, le panneau développé dans cette étude affiche des performances environnementales favorables, avec une empreinte carbone de 0,652 kg CO₂ eq, soit une réduction de 49,49 % par rapport aux plaques de plâtre (1,291 kg CO₂ eq). Ce résultat est attribuable à l'utilisation de matériaux naturels et renouvelables, tels que les fibres de chanvre, qui captent le carbone grâce à la photosynthèse, un faible dosage en ciment, et des composants à faible impact comme le tannin et les marins non traités.

Par ailleurs, bien que les panneaux à base de laine de mouton et de biocomposite soient composés de fibres naturelles (laine de mouton et fibres de lin), leurs impacts environnementaux dépassent ceux du panneau de plâtre conventionnel dans plusieurs catégories, notamment le réchauffement climatique, avec des émissions variantes entre 4,29 kg et 8,09 kg CO₂ eq. Cette tendance s'explique par la présence de matériaux à forte intensité carbone dans leur formulation, notamment le plâtre et l'acier galvanisé. Le panneau à base de laine de mouton est constitué de 80,6 % de plâtre, 10 % de laine de mouton et 9,4 % d'acier galvanisé utilisé pour le cadre, tandis que l'autre contient 64,5 % de biocomposite, 19 % de laine et 16,5 % d'acier. La production de 1 kg d'acier galvanisé est associée

à une émission moyenne de 2,72 kg de CO₂/kg équivalent, ce qui contribue de manière substantielle à l’empreinte carbone de ces matériaux. Ces résultats soulignent que l’origine biosourcée de certains composants ne suffit pas à garantir une faible empreinte environnementale, lorsque le reste de la composition intègre des éléments à fort impact, tels que les métaux ou les liants conventionnels.

De même, une autre étude de Quintana et al. (2018) a montré que l’utilisation de fibres naturelles et de résine époxy biosourcée dans les panneaux composites pouvait réduire les émissions de CO₂ de 50 % notamment au composite à base de lin.

FIGURE 4. Analyse des impacts environnementaux des différents panneaux muraux.



C. Analyse comparative des bénéfices environnementaux des panneaux muraux

Le bénéfice environnemental correspond à la réduction relative des impacts par rapport à une référence, exprimé en pourcentage et calculé selon l’équation suivante :

$$\text{Bénéfice (\%)} = \frac{\text{Impact référence} - \text{Impact optimisé}}{\text{Impact référence}} \times 100 \quad (1)$$

Où :

- Impact référence : l’impact environnemental du scénario conventionnel,
- Impact optimisé : l’impact environnemental du scénario développé,

La Figure 5 présente une analyse comparative des bénéfices environnementaux du panneau développé par rapport à ceux déjà mentionnés.

Les résultats montrent une réduction globale de potentiel de réchauffement climatique de 49,50% par rapport au panneau conventionnel et de 98% par rapport au panneau en laine de mouton. L’amélioration est également significative pour la consommation d’eau (84 %) et la radiation ionisante (de 10,97 % à 83,90 %). Enfin, les impacts liés à la toxicité environnementale et humaine (qui regroupent l’écotoxicité terrestre, aquatique et marine, ainsi que la toxicité humaine cancérogène et non cancérogène) affichent des bénéfices situant entre 29,66 % et 98,04 %, en raison de la réduction des intrants issus de l’extraction minière et de la moindre intensité des procédés de transformation.

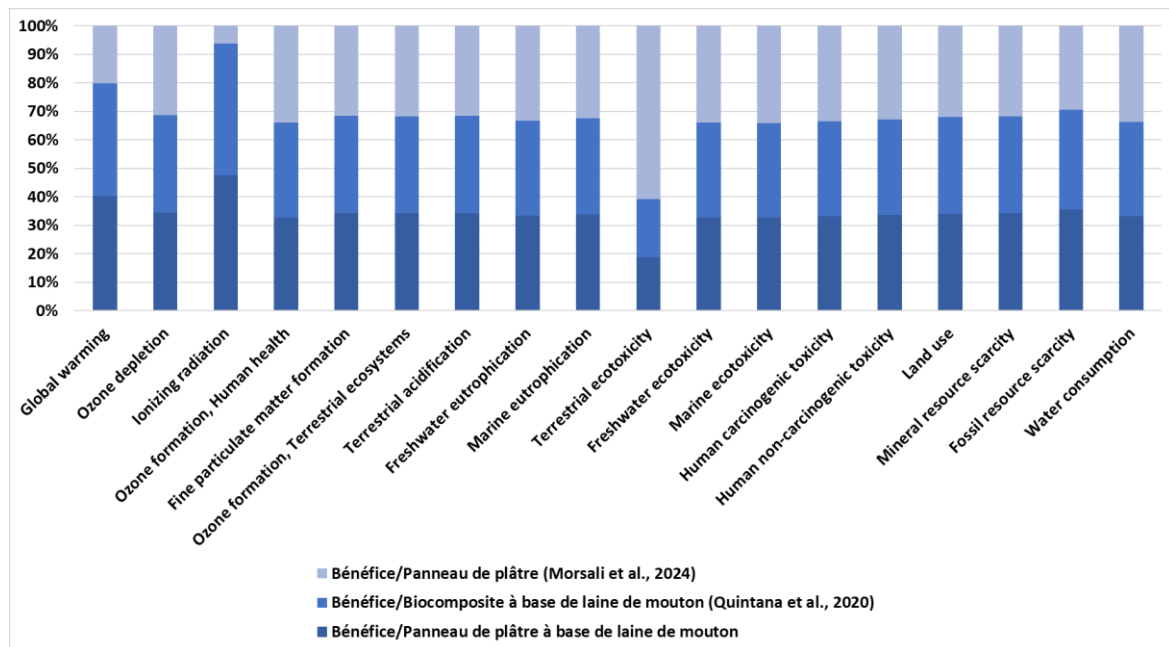


FIGURE 5. Comparaison des bénéfices environnementaux.

IV. CONCLUSION

En guise de conclusion, l'analyse environnementale du panneau développé à base de chanvre, de tannin et de marins tunneliers révèle une réduction globale des impacts comprise entre 86 à 92 % par rapport au panneau conventionnel et celui de laine de mouton. L'utilisation combinée de matières biosourcées et géosourcées permet de limiter significativement les émissions associées à la phase de production (A1-A3). Dans la suite de ce travail, l'étude sera approfondie en analysant les impacts Endpoint, tels que les dommages potentiels sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles. Une ACV complète, intégrant aussi les aspects de circularité (réemploi, recyclage, fin de vie), sera envisagée pour évaluer la durabilité globale du matériau développé.

REFERENCES

UNEP, 2022. Not yet built for purpose: Global building sector emissions still high. Available at: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/not-yet-built-purpose-global-building-sector-emissions-still-high>.

AIE (Agence Internationale de l'Énergie), 2021. Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

Statista. (2024). Global carbon dioxide emissions from cement manufacturing worldwide from 1990 to 2021 (in gigatons). Statista. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/1299532/carbon-dioxide-emissions-worldwide-cement-manufacturing/>

Société du Grand Paris (SGP), 2022. La gestion des déblais du Grand Paris Express. Available at: <https://www.grandparisexpress.fr/sites/default/files/2023-06/167797-qwd0fd75eb.pdf>.

Lagouin, M., Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.E., Bertron, A., 2021. Effects of organic admixtures on the fresh and mechanical properties of earth-based plasters. *Journal of Building Engineering*, 38, 102191. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102379>.

Rocha, D., Faria, P., Lucas, S.S., 2023. Additive manufacturing of earth-based materials: A literature review on mortar composition, extrusion, and processing earth. *Materials*, 16(1), 202. <https://doi.org/10.3390/ma17010202>.

Boutin, M.-P., Flamin, C., Quinton, S., & Gosse, G., 2006. Étude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie. Rapport réalisé pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris. INRA Lille.

Hagerman, A.E., 1998. Tannins and lignins: Interactions and ecological roles. In: *Secondary Metabolites and Plant Interactions*. Springer, pp. 355–388.

Brás, A., Yakubu, I., Mohammed, H., Idowu, I.A., Jones, R., Gagnon, A.S., Owusu-Nimo, F., Huang, Y., Beckett, C.T.S., Addo, I.A., 2024. Bio-stabilising earthen houses with tannins from locally available resources. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03182. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03182>.

Ghorbel, I., CUCCAGNA, F., MIGNOT, V., NOUALI, F., 2024. Excavated earth incorporating hemp and tannin for the manufacture of thermally insulating wall panels. *Proceedings of the RILEM Spring Convention and Conference 2024*.

ISO 14040:2006 – Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre - Exigences et lignes directrices.

AFNOR, 2019. NF EN 15804+A2 – Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles fondamentales pour la catégorie de produits de construction.

DIN 18947 (2018) Earth plasters- Requirements, test and labelling. DIN Deutsches Institut fur Normung, Alleinverkauf der Normen durch Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.

Barjoveanu, G., Pătrăuțanu, O.-A., Teodosiu, C., & Volf, I., 2020. Life cycle assessment of polyphenols extraction processes from waste biomass. *Scientific Reports*, 10, pp. 13632. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70587-w>.

Morsali S, Rakhshanbabanari K, Osmani M, Cavalaro S, Gutai M, Castro-Díaz M, et al. Life Cycle Assessment of Plasterboard Production: A UK Case Study. *Sustainability* 2024;16:3564. <https://doi.org/10.3390/su16093564>.

Hauschild, M.Z.; Goedkoop, M.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; Jolliet, O.; Margni, M.; De Schryver, A.; Humbert, S.; Laurent, A.; et al. Identifying best existing practice for

characterization modeling in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2013, 18, 683–697.

Quintana-Gallardo, A., Alba, J., del Rey, R., Crespo-Amorós, J. E., & Guillén-Guillamón, I. (2020). Life-Cycle Assessment and Acoustic Simulation of Drywall Building Partitions with Bio-Based Materials. *Polymers*, 12(9), 1965. <https://doi.org/10.3390/polym12091965>.

Quintana-Gallardo, A.; Alba, J.; del Rey, R.; Guillén-Guillamón, I. Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. *J. Clean. Prod.* 2018, 185, 408–420.