

La terre crue : une réponse pour la circularité du secteur du bâtiment

Erwan Hamard¹, Loris Verron^{1,2}, Rhoda Julia Ansa-Asare^{1,2}, Andry Razakamanantsoa², Myriam Duc³

¹Univ Gustave Eiffel, MAST-GPEM, F-44344 Bouguenais, France

²Univ Gustave Eiffel, GERS-GIE, Bouguenais F- 44344, France

³Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, Marne-la-Vallée F-77454, France

RESUME

La construction en terre crue valorise un déchet abondant, disponible sur ou à proximité des chantiers et bien réparti sur l'ensemble du territoire. Elle utilise des méthodes de mise en œuvre simple et ayant un faible impact environnemental. Elle se recycle intégralement en fin de vie, en utilisant les mêmes procédés à faible impact et produit des éléments de performance égale à celle d'origine. Dans un contexte de raréfaction des ressources et des énergies, la terre crue offre une perspective d'abondance à faible impact. Elle nous paraît donc comme porteuse d'avenir pour inscrire le secteur du bâtiment dans une démarche vertueuse d'économie circulaire. Afin de maintenir les bénéfices environnementaux offerts par la terre crue, il est préférable de limiter au maximum le transport de la matière, d'éviter les reformulations ainsi que le traitement aux liants hydrauliques. De plus, afin de valoriser un grand nombre de terres sans reformulation, il est important d'adapter la technique à la terre et donc de disposer d'un savoir-faire important dans l'équipe de maîtrise d'œuvre.

Mots-clefs Terre crue, Economie circulaire, Terre excavées, Matériau bas carbone

I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment génère environ 20 % des émissions totales de gaz à effet de serre d'origine anthropique (Edenhofer et al., 2014) et utilise un grand volume de ressources naturelles. Par exemple, le sable et le gravier sont les matériaux les plus extraits (Bendixen et al., 2019), et leur exploitation a un impact considérable sur la biodiversité (Park et al., 2020; Zou et al., 2019). Le secteur de la construction est également responsable d'environ 50 % des déchets produits dans l'Union européenne et de 25 % des déchets solides à l'échelle mondiale. La gestion de ces déchets a un impact environnemental important (Dahlbo et al., 2015). Parmi ces déchets, environ 75 % sont des sols et des pierres naturelles (Cabello Eras et al., 2013). Les sols excavés, également appelés terre, sont considérés comme des déchets dans les pays occidentaux, mais la terre a été utilisée depuis, au moins, le début de la révolution Néolithique, comme matériau de construction. Ils constituent le déchet le plus abondant produit au niveau de l'Union Européenne.

Alors que nous avons de plus en plus de difficultés à trouver des gisements de granulats naturels pour la construction, nous n'avons jamais autant produit de terres d'excavation. La comparaison entre le Tell d'Arslantepe, un des Tell les plus imposant du Néolithique, et l'Installation de Stockage de Déchets Inertes de Villeneuve-sous-Dammartin, qui n'est que l'un des 75 sites recevant des déchets inertes en Ile-de-France (Figure 1) nous montre à quel point notre impact sur les flux de matières s'est drastiquement accru depuis le Néolithique. Le volume des matériaux transportés par l'Homme est désormais bien plus important que le volume de matériaux transportés par les processus naturels (Douglas and Lawson, 2000). Or, les terres excavées sont inutilisées et finissent en réaménagements paysagers ou en remplissage d'anciennes carrières (Figure 1).



Figure 1. À gauche, Tell d'Arslantepe (Turquie), 30 m de haut, fruit de l'accumulation des matériaux de constructions pendant les 6 000 ans d'occupation du site. À droite, colline artificielle de Villeneuve-sous-Dammartin (77), emprise de 130 ha culminant à 30 m, fruit de l'accumulation des terres d'excavations de la région parisienne au rythme de 2 Mt/an, représenté avec son projet d'œuvre « Les yeux du ciel » (Antoine Grumbach/ECT)

Les villes sont majoritairement construites en béton, ce qui requiert des quantités très importantes de granulats naturels (sables et graviers). Ces granulats sont extraits du sous-sol des mers et des continents. Par exemple, la région Ile-de-France (France) consomme annuellement environ 26 Mt de granulats dont 12 sont importés d'autres régions (Figure 2). En parallèle, un des plus gros chantiers en cours dans la région est la réalisation du Grand Paris Express, qui a généré 26 Mt de terre d'excavation dont 13 ont été valorisés (Figure 3). Ces déchets doivent être exportés dans des installations de stockages de déchets inertes. Pour résumer simplement les flux de matière en jeu pour la construction d'une ville comme Paris et sa banlieue, des granulats sont extraits dans des carrières en périphérie des villes et importés sur les chantiers de constructions, chantiers qui génèrent des quantités de terres d'excavation très importantes qui sont exportées depuis les chantiers de construction vers les carrières de granulats pour les combler en fin d'activité. Ces flux pourraient être évités si les terres d'excavations, disponibles directement ou à proximité des chantiers, étaient employées pour la construction en substitution du béton.

L'utilisation des terres d'excavation pour la construction et la rénovation offre une perspective prometteuse pour faire entrer le secteur du bâtiment pleinement dans l'économie circulaire. Cependant, l'emploi de cette ressource soulève plusieurs questions, en particulier l'identification des terres utilisables pour la construction parmi les flux de terres excavées, l'optimisation du choix

de la technique de mise en œuvre, la disponibilité de la ressource, l'optimisation du transport et la gestion en fin de vie de la terre. Cet article tente d'apporter des réponses concrètes à ces questions, en s'appuyant sur des travaux récents.

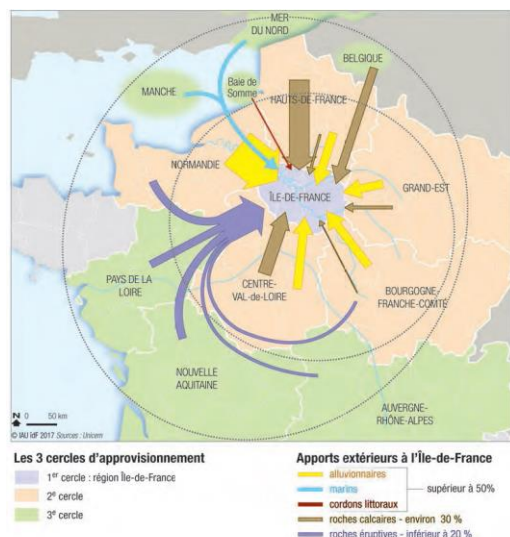


Figure 2. Consommation annuelle de granulats de la région Ile-de-France, 26,3 Mt dont 11,9 Mt importés (Garcia et al., 2017)

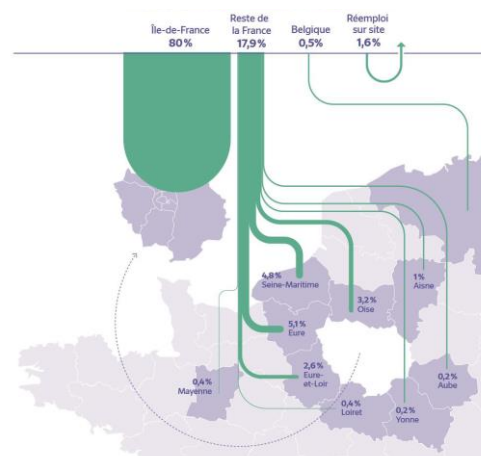


Figure 3. Destination des 13 Mt de terres valorisées du chantier du Grand Paris Express (Société du Grand Paris, 2022)

II. LES ENJEUX DE LA CONVENANCE DES TERRES

Le taux de renouvellement des sols n'est pas suffisamment rapide pour considérer qu'il s'agisse d'une ressource renouvelable. La terre est donc une ressource fossile, dès lors, la question des stocks disponibles et de sa bonne gestion se pose. Les stocks de terres ont été évalués à l'échelle de la région Bretagne (France) et les estimations montrent qu'il sont suffisamment importants pour permettre un développement à grande échelle de l'emploi de la terre crue sans que cela n'est d'impact significatif sur le stock (Hamard et al., 2018). Quoiqu'il en soit, la terre est déjà rendue disponible, en grande quantité, par les chantiers du secteur du bâtiment et des travaux publics. Le secteur actuel de la construction en terre prélève sa ressource non pas dans les stocks de terre en place dans le sol, mais dans les flux de matière générés par les chantiers. Réemployer des terres excavées pour construire en terre suppose d'être en mesure d'identifier et d'orienter les bonnes terres à bâtir.

L'outil le plus couramment employé pour définir la convenance d'une terre vis-à-vis d'une technique est le fuseau granulométrique. Lorsque ces fuseaux sont confrontés aux matériaux utilisés dans le patrimoine, composé de bâtiments centenaire à pluricentenaire, ils se montrent beaucoup trop restrictifs et conduisent à écarter un nombre important de terres qui seraient convenables (Rojat et al., 2020). Ils ont également le défaut de pousser les constructeurs à corriger les terres de site en y ajoutant ou supprimant des fractions granulométriques. Ces corrections ont pour effet d'augmenter l'impact environnemental du matériau reformulé quand il nécessite l'ajout

de sable et/ou de gravier naturel. Ces corrections peuvent également avoir pour effet de perturber la continuité granulométrique naturelle de la terre, ce qui réduit sa compacité et, par conséquent, sa résistance mécanique (Cuccurullo, 2019).

De nombreux autres paramètres sont utilisés pour tenter de déterminer la convenance des terres (Jiménez Delgado and Guerrero, 2007). Ces paramètres sont utilisés, voir exigés, sur les chantiers, comme des critères à respecter afin de garantir un niveau de performance, en particulier mécanique, ce qu'ils ne sont pas. Pourtant, il n'est en effet pas possible, à l'heure actuelle, de prédire une performance avec un niveau de précision suffisant à partir des propriétés intrinsèques d'un sol pour servir de justification structurelle. Au-delà de la difficulté de modélisation du comportement des sols, les mises en œuvres très diverses réalisées par les maçons, qui pétrissent, mélangent, adjuvantent, moulent, compactent la matière, en modifient la microstructure et donc les performances. Les paramètres liés à la mise en œuvre ont une influence significative sur la performance des éléments d'ouvrage (Ansa-Asare et al., 2024). Les techniques de mise en œuvre étant aussi nombreuses qu'il y a de maçons, il paraît impossible de modéliser la grande diversité des procédés de mise en œuvre pour prédire une performance. C'est ce qui conduit à adopter une démarche performantielle, qui permet aux maçons d'utiliser la terre et la technique de leur choix et de mesurer directement la performance des éléments d'ouvrages produits (Hamard et al., 2013).

III. DE LA CONVENANCE DES TERRES A LA CONVENANCE DES TECHNIQUES

En analysant le sujet de la « convenance des terres » du point de vue du chantier, on constate que ce qui fait la qualité d'une terre à bâtir n'est pas un niveau de performance, mais plutôt la facilité avec laquelle un.e maçon.ne est en mesure de mettre en œuvre la terre. Cette vision, relativement contradictoire par rapport à une démarche d'ingénierie classique, qui viserait à optimiser la résistance mécanique de la matière, est illustrée dans les résultats de l'étude de Polidori et al., (2025) réalisée en Champagne. Des adobes prélevés dans des murs porteurs présentent une résistance mécanique bien moindre que celle d'adobes prélevés dans des remplissages de structures en pans de bois, donc non porteurs. Les maçons de l'époque n'ont pas cherché la terre la plus résistante, mais ont adapté la mise en œuvre et la conception de l'ouvrage aux spécificités de la terre locale.

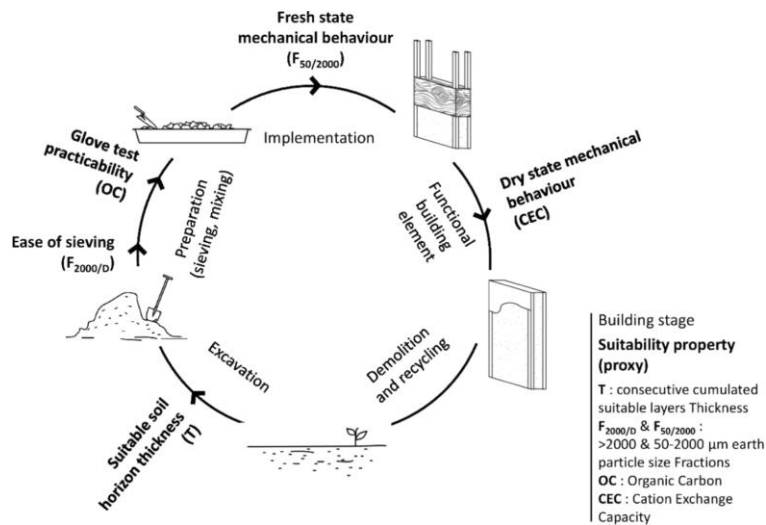


Figure 4. Identification des critères de convenance pour la terre allégée, pour chaque étape du cycle de vie de l'ouvrage (Verron et al., 2022).

Ce point de vue original a été adopté afin de discuter la convenance des terres pour la technique de la terre allégée (Verron et al., 2022). Des critères de convenance sont proposés afin de discriminer les terres convenables selon leur potentiel de facilité d'usage à chaque étape du cycle de vie du matériau (Figure 4). Ce critère correspond en effet à la réalité de chantier puisque plus une terre est facile à mettre en œuvre et plus le procédé est économique. Cette approche a également l'avantage de poser la question de l'emploi optimal des gisements locaux non reformulés. C'est en effet la technique de mise en œuvre qui s'adapte à la terre et non l'inverse. Cette approche met à profit la grande diversité des techniques de construction offertes par le matériau terre crue.

IV. UNE RESSOURCE ABONDANTE ET VERITABLEMENT LOCALE

Les critères de convenance identifiés au cours du cycle de vie de l'ouvrage ont été utilisés pour quantifier la ressource disponible pour construire en terre allégée en Bretagne (Verron et al., 2022). Si l'ensemble des terres d'excavation convenable étaient mobilisées pour la terre allégée, il faudrait seulement 8 ans pour réaliser la rénovation thermique de l'ensemble du parc immobilier tout en isolant l'ensemble des constructions neuves construites pendant ce laps de temps (Verron et al., 2022). Il est également estimé que 99,5 % du territoire breton se trouve à moins de 1 km d'une ressource de sol adaptée à la construction en terre allégée et que la distance maximale à parcourir pour atteindre une ressource serait de 2,3 km. Ces valeurs ne sont valables que pour la technique de la terre allégée en Bretagne et ne peuvent être généralisées à tous les territoires. Mais elles montrent que, sur certains territoires, la ressource, en plus d'être abondante, est bien distribuée et que, s'il n'y a pas assez de terre sur un chantier, il est généralement possible de trouver un gisement à proximité, c'est-à-dire à quelques kilomètres.

V. PEUT-ON TRANSPORTER LA TERRE ?

La proximité de la ressource est d'autant plus importante pour les murs porteurs en terre crue, qui requièrent une masse de terre importante. Pour les aspects structurels on peut comparer les murs en terre crue aux parpaings. Les parpaings étant creux, ils nécessitent de transporter moins de matière pour une performance mécanique de même ordre. Ceci a un impact direct sur les coûts économiques et environnementaux du transport de cette matière. Une comparaison entre parpaing et pisé est proposée dans la Figure 5, en prenant comme indicateur le réchauffement climatique en équivalent de kg de CO₂, pour le cas de la France. La distance moyenne de transport des parpaings entre le site de production et de construction est de 57 km. Un impact environnemental équivalent à cette distance de transport pour le parpaing est atteint pour le pisé avec une distance de 3,5 km. Si la terre à pisé est transportée sur plus de 100 km, alors l'impact du transport du pisé apparaît supérieur à celui de la fabrication, du transport et de la mise en œuvre du parpaing. Ceci illustre la nécessité de réduire les distances de transport au minimum et de favoriser l'utilisation de terre locales (moins de quelques km de distance) et la transformation de la terre en élément d'ouvrage directement sur le site d'excavation ou de construction.

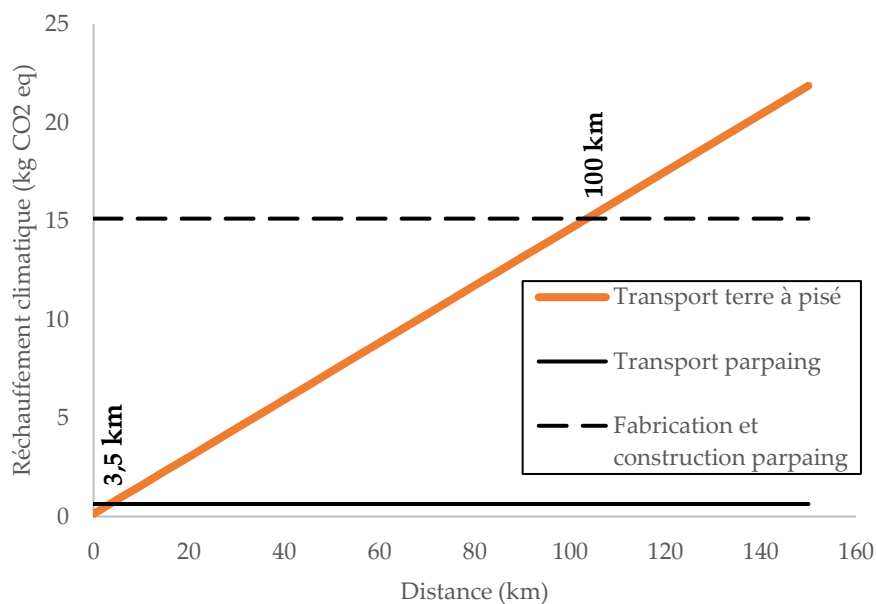


Figure 5. Comparaison des impacts sur le réchauffement climatique du transport entre la construction en parpaing et en pisé en France (CERIB, 2017; CSTB, 2019)

VI. UN MATERIAU RECYCLABLE A 100 %

Quelques études ont évaluées la recyclabilité des Blocs de Terre Comprimée (Bruno et al., 2020; Audren et al., 2024) et des adobes (Polidori et al., 2025a). Les différents auteurs ont observé une légère diminution de la taille des plus grosses particules dans la terre, cependant, les performances des briques sont restées constantes après trois cycles de recyclage. Cette observation est valable uniquement pour la terre crue et non pour la terre traitée au liant hydraulique qui perd de son

argilosité et requiert un nouveau traitement à chaque cycle de recyclage (Audren et al., 2024; Bruno et al., 2020).

Les procédés de recyclage des briques de terre crue étudiés consistent à remettre en œuvre la terre selon les procédés traditionnels qui ne nécessitent que très peu d'énergie. C'est une particularité de ce matériau au regard des autres matériaux de construction qui nécessitent des traitements énergivores et/ou ne sont pas intégralement recyclables. La plupart des matériaux de construction conventionnels sont extraits de la roche mère et des dépôts géologiques, subissant des modifications chimiques lors de leur fabrication, ce qui limite leur capacité à être recyclés à faible coût énergétique (Morel et al., 2021). A l'inverse, l'architecture en terre utilise des matériaux meubles provenant du sol, leur permettant d'être entièrement recyclés sans perte tout au long de la chaîne de valeur, en parfaite adéquation avec les principes de l'économie circulaire (Fabbri et al., 2021).

VII. CONCLUSION

La construction en terre crue valorise un déchet abondant, disponible sur ou à proximité des chantiers et bien réparti sur l'ensemble du territoire. Elle utilise des méthodes de mise en œuvre simples et de faible impact environnementaux. Elle se recycle intégralement en fin de vie, en utilisant les mêmes procédés à faible impact et produit des éléments de performance égale à celle d'origine. Dans un contexte de raréfaction des ressources et des énergies, la terre crue offre une perspective d'abondance à faible impact. Elle nous paraît donc comme porteuse d'avenir pour inscrire le secteur du bâtiment dans une démarche vertueuse d'économie circulaire.

Cependant, les pratiques de construction en terre sont plus ou moins vertueuses et il est important d'étudier leurs impacts afin d'éclairer la filière sur sa stratégie de développement. Afin de maintenir les bénéfices environnementaux offerts par la terre crue, il est préférable de limiter au maximum le transport de la matière, d'éviter les reformulations ainsi que le traitement aux liants hydrauliques. De plus, afin de valoriser un grand nombre de terres sans pousser à leur reformulation, il est important d'adapter la technique à la terre locale et donc de disposer d'un savoir-faire important dans l'équipe de maîtrise d'œuvre. Cette démarche nécessite par ailleurs de repenser l'organisation des projets de construction et des chantiers. Elle est appliquée avec succès en France depuis de nombreuses années, mais requiert de former les acteurs du secteur du bâtiment.

REFERENCES

- Ansa-Asare, R.J., Razakamanantsoa, A., Hamard, E., Duc, M., Cazacliu, B., Verron, L., 2024. Impact of earth variability and implementation processes on hydromechanical and microstructure properties of sustainable construction materials. *Constr. Build. Mater.* 417, 135303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135303>
- Audren, M., Guihéneuf, S., Borgne, T.L., Rangedard, D., Perrot, A., 2024. Assessing the Recyclability of Raw Stabilised Compressed Earth Blocks. pp. 226–235. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62690-6_23
- Bendixen, M., Best, J., Hackney, C., Iversen, L.L., 2019. Time is running out for sand. *Nature* 571, 29–31. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02042-4>
- Bruno, A.W., Scott, B., D’Offay-Mancienne, Y., Perlot, C., 2020. Recyclability, durability and water vapour adsorption of unstabilised and stabilised compressed earth bricks. *Mater. Struct. Constr.* 53. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01585-7>
- Cabello Eras, J.J., Gutiérrez, A.S., Capote, D.H., Hens, L., Vandecasteele, C., 2013. Improving the environmental performance of an earthwork project using cleaner production strategies. *J. Clean. Prod.* 47, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.026>
- CERIB, 2017. Fiche de déclaration environnementale et sanitaire, Bloc en béton, pose à joint épais.
- CSTB, 2019. Réponses aux questions de la filière terre crue et analyse de sensibilité. DHUP/CSTB.
- Cuccurullo, A., 2019. Earth stabilisation by plant-derived urease enzyme for building applications.
- Dahlbo, H., Bachér, J., Lähtinen, K., Jouttijärvi, T., Suoheimo, P., Mattila, T., Sironen, S., Myllymaa, T., Saramäki, K., 2015. Construction and demolition waste management - A holistic evaluation of environmental performance. *J. Clean. Prod.* 107, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.073>
- Douglas, I., Lawson, N., 2000. The human dimensions of geomorphological work in Britain. *J. Ind. Ecol.* 4, 9–33. <https://doi.org/10.1162/108819800569771>
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., 2014. IPCC, 2014: Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014: Summary for Policymakers, in: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge University Press, New York (USA).
- Fabbri, A., Morel, J.C., Aubert, J.E., Bui, Q.B., Gallipoli, D., Ventura, A., Reddy, V.B.V., Hamard, E., Pelé-peltier, A., Abhilash, H.N., 2021. An overview of the remaining challenges of the RILEM TC 274-TCE, testing and characterisation of earth-based building materials and elements. *RILEM Tech. Lett.* 6, 150–157. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.149>
- Garcia, S., Faytre, L., Benharrou, J., 2017. Granulats en Ile-de-France, Panorama régional.
- Hamard, E., Lemercier, B., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., Morel, J.-C., 2018. A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction – Application to cob in Brittany. *Constr. Build. Mater.* 170, 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097>
- Hamard, E., Morel, J.C., Salgado, F., Marcom, A., Meunier, N., 2013. A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *J. Cult. Herit.* 14, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.005>
- Jiménez Delgado, M.C., Guerrero, I.C., 2007. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Constr. Build. Mater.* 21, 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>
- Morel, J.C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., Bui, Q.B., 2021. Earth as construction material in the circular economy context: Practitioner perspectives on barriers to overcome. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 376. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>
- Park, E., Ho, H.L., Tran, D.D., Yang, X., Alcantara, E., Merino, E., Son, V.H., 2020. Dramatic decrease of flood frequency in the Mekong Delta due to river-bed mining and dyke construction. *Sci. Total Environ.* 723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138066>
- Polidori, G., Aras-Gaudry, A., Beaumont, F., Bogard, F., Murer, S., Nait-Rabah, O., Bliard, C., Fronteau, G., Hamard, E., 2025a. Recyclability of vernacular adobes with high chalk content in the context of sustainable construction. *Case Stud. Constr. Mater.* 22, e04145. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04145>

- Polidori, G., Aras-Gaudry, A., Rousse, C., Beaumont, F., Bogard, F., Murer, S., Moussa, T., Bliard, C., Fronteau, G., Hamard, E., 2025b. Analysis of adobes from vernacular raw earth buildings in the Champagne region (France). *Constr. Build. Mater.* 470, 140582. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140582>
- Rojat, F., Hamard, E., Fabbri, A., Carnus, B., McGregor, F., 2020. Towards an easy decision tool to assess soil suitability for earth building. *Constr. Build. Mater.* 257, 119544. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119544>
- Société du Grand paris, 2022. Traçabilité, évacuation valorisation : sur les traces des terres du grand paris express.
- Verron, L., Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., Duc, M., Vincelas, T., Hellouin de Menibus, A., Lemercier, B., Ansa-Asare, R.J., Lecompte, T., 2022. Estimating and mapping the availability of earth resource for light earth building using a soil geodatabase in Brittany (France). *Resour. Conserv. Recycl.* 184, 106409. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106409>
- Zou, W., Tolonen, K.T., Zhu, G., Qin, B., Zhang, Y., Cao, Z., Kai, P., Cai, Y., Gong, Z., 2019. Catastrophic effects of sand mining on macroinvertebrates in a large shallow lake with implications for management. *Sci. Total Environ.* 695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133706>