

Mémoire de fin d'études : "Quel est le potentiel d'utilisation des terres excavées en Wallonie pour la production locale de matériaux de construction en terre crue ?"

Auteur : Hoffmann, Emma

Promoteur(s) : Henz, Olivier

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18031>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE – FACULTÉ D'ARCHITECTURE

*Quel est le potentiel d'utilisation des terres excavées en
Wallonie pour la production locale de matériaux de
construction en terre crue ?*

Travail de fin d'études présenté par Emma HOFFMANN en vue de l'obtention du grade de
Master en Architecture

Sous la direction de : Olivier HENZ

Année académique 2022-2023

Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont apporté leur contribution à ce travail et qui m'ont soutenue à tous les niveaux, que ce soit sous la forme de conseils, de discussions enrichissantes ou simplement de moments d'écoute.

Je remercie tout particulièrement mon promoteur, Monsieur Henz, pour son soutien, son expertise et ses précieux conseils pendant la rédaction de ce travail. Ses conseils avisés m'ont été d'une valeur inestimable.

Je tiens également à remercier tout particulièrement les membres du jury, Isabelle Laurent, Ruellan Guirec et Michel Amand, qui vont jouer un rôle crucial dans l'évaluation de ma thèse. Je leur suis d'avance reconnaissante pour le temps et les efforts qu'ils vont consacrer à cette tâche importante.

J'adresse également mes sincères remerciements à Madame Hammerel qui a généreusement donné de son temps pour la relecture et la correction de mon mémoire. Son engagement a contribué à améliorer la qualité de mon travail et je lui en suis très reconnaissante.

À mes chères amies : Vous avez été mes compagnes de route tout au long de cette expérience. Votre présence, vos encouragements m'ont aidée à surmonter les moments de doute et de fatigue. Votre amitié est une richesse que j'apprécie énormément.

Enfin, un immense merci à mes parents, dont le soutien et les encouragements constants m'ont permis de persévérer dans cette aventure académique. Leur confiance en moi a été ma source d'inspiration et de motivation.

La réalisation de ce travail a été une expérience motivante et enrichissante, rendue possible grâce au soutien et à la bienveillance de nombreuses personnes. Je les remercie toutes d'avoir fait partie de cette étape importante de ma vie académique.

Emma

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 5 |
| Méthodologie..... | 9 |
| Structure du travail..... | 10 |
| Etat de l’art | 11 |
| La situation actuelle | 15 |
| L’économie linéaire | 16 |
| L’économie circulaire | 16 |
| De l’économie linéaire à l’économie circulaire avec la terre | 17 |
| La terre crue | 19 |
| Les avantages et caractéristiques | 20 |
| Aspect environnemental | 20 |
| Aspect technique..... | 20 |
| Aspect économique..... | 21 |
| Raisons de la faible utilisation | 21 |
| Les méthodes | 22 |
| Les méthodes traditionnelles | 23 |
| Préfabrication de pisé – Martin Rauch, Lehm Ton Erde..... | 25 |
| Préfabrication – BC materials..... | 27 |
| L’histoire de la terre crue | 31 |
| La terre dans le monde..... | 31 |
| La terre en Belgique | 33 |
| Projets récents en terre crue..... | 35 |
| BC materials..... | 35 |
| Martin Rauch – Lehm Ton Erde | 37 |
| Autres projets précurseurs..... | 42 |
| CRATERre | 44 |
| La terre en Wallonie | 46 |
| Analyse et évaluation des types de terres | 47 |
| Composition des sols..... | 47 |
| L’état des sols | 48 |
| Réutilisation des déblais localement sur le site de construction | 50 |
| Premier cas : Maison sans cave..... | 50 |
| Deuxième cas : Maison avec cave | 51 |
| Le potentiel pour la production locale sur chantier..... | 52 |

| | |
|--|-----------|
| Exemple du projet Cycle Terre en France | 54 |
| Valorisation des déchets | 56 |
| Sites récepteurs et installations autorisées par Walterre..... | 57 |
| Le potentiel d'utilisation des déblais pour la construction..... | 58 |
| Premier cas : maisons d'habitation..... | 58 |
| Deuxième cas : rénovations | 59 |
| Troisième cas : habitations nouvelles et rénovations..... | 60 |
| Analyse comparative | 61 |
| « Stop au béton » - artificialisation et étalement urbain observables en Wallonie..... | 64 |
| Conclusion | 66 |
| Bibliographie..... | 70 |
| Table des figures | 77 |

Introduction

Aujourd'hui, le secteur de la construction est responsable d'une grande partie de notre impact sur l'environnement, notamment en ce qui concerne l'épuisement des ressources, l'utilisation des sols et la pollution de notre écosystème. Au niveau mondial, l'industrie de la construction est responsable de plus de 30% de l'extraction des ressources naturelles et de 25% de la production mondiale de déchets solides (Benachio, Freitas, & Tavares, 2020). En Belgique, environ 20% du territoire est transformé en espace bâti. Dans notre pays, les travaux de construction et de démolition génèrent environ 40% de la production totale de déchets et les travaux de construction et d'entretien représentent près de 50% des flux de matériaux.

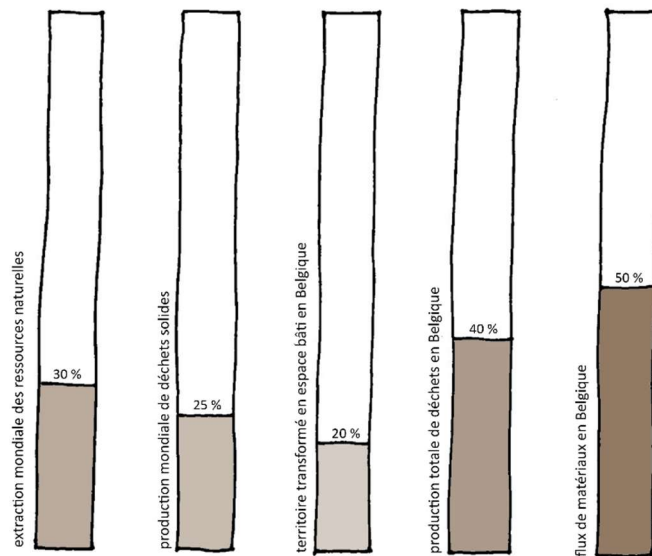


Figure 1 : Présentation des pourcentages © représentation personnelle basée sur les chiffres cités dans le texte

Cela est principalement dû au fait que dans le secteur de la construction, le système économique linéaire est encore prédominant. Il répond à des besoins à court terme avec des solutions matérielles et constructives à long terme et le plein potentiel des différents matériaux et ressources matérielles n'y est pratiquement jamais exploité (European Environment Agency, 2012 & 2015). Le système linéaire désigne un système économique basé sur l'idée de « prendre, faire, jeter ». Dans ce modèle, les ressources naturelles sont extraites, puis exploitées pour produire des matériaux, qui sont eux-mêmes introduits dans des bâtiments d'une manière telle qu'ils ne peuvent pas être déconstruits. À la fin de la vie du bâtiment, ces matériaux deviennent obsolètes et sont éliminés avec tous les autres déchets produits tout au long du processus au lieu d'être recyclés de manière optimale à la fin de leur durée d'utilisation (Benachio, Freitas, & Tavares, 2020). Ce concept d'extraction, de consommation, de production et d'élimination n'est durable ni pour la croissance de notre économie, ni pour le maintien et le respect de notre écosystème, ni pour le développement et les besoins des générations futures. C'est pourquoi il est important d'essayer de mettre en place de plus en plus d'économie circulaire (Romnée & Vrijders, 2018). Ce système s'oppose au système linéaire. L'économie circulaire est, selon le CSTC, un modèle qui repose sur la conservation de la valeur des produits et des matériaux aussi longtemps que possible. Il s'agit donc d'un système qui permet la préservation des ressources naturelles, le progrès social et le développement économique. Cette économie circulaire met l'accent sur de nouveaux modèles de production, de conception et de consommation qui prolongent la durée de vie du produit et permettent ou facilitent la réutilisation et le recyclage des composants (Deweerd, 2020).

La Commission européenne propose également une définition d'une économie circulaire. Selon elle, l'économie circulaire permet de conserver la valeur des produits et des matériaux aussi longtemps que possible et de réduire au minimum la consommation, les déchets et l'exploitation des ressources. Lorsqu'un produit arrive néanmoins en fin de vie, il faut essayer de conserver les différentes ressources qui le composent dans le cycle économique et de les réutiliser pour créer de la valeur (Parlement européen, 2015). Cette économie circulaire repose sur le partage, le prêt, la réutilisation, la réparation, la rénovation ou le recyclage en circuit (presque) fermé. Les déchets sont réduits du fait que les produits et les matériaux qu'ils contiennent ont une grande valeur. Le Parlement européen espère ainsi que le passage à une économie circulaire permettra de réduire l'impact environnemental, d'améliorer la sécurité de l'approvisionnement en matières premières, d'accroître la compétitivité, la croissance, l'innovation et même l'emploi (Parlement européen, 2015).

Dans ce contexte, le matériau « terre crue » peut avoir un rôle à jouer et retrouver sa place dans le secteur de la construction. La terre crue est l'un des principaux matériaux de construction dits « naturels ». Elle est en outre disponible de manière abondante dans la plupart des régions du monde où, aujourd'hui encore, un tiers des personnes vit dans des maisons en argile, car c'est depuis toujours le matériau de construction le plus répandu dans les zones climatiques chaudes, sèches et tempérées.

C'est surtout dans les pays en voie de développement que le matériau terre crue est considéré comme une matière première locale « précieuse », car ces pays ne peuvent pas se permettre de construire leurs logements à l'aide de matériaux de construction plus industrialisés comme la brique, le béton et l'acier. La plupart du temps, la terre est extraite directement sur le chantier lors du creusement des fondations ou des caves. Dans les pays industrialisés, ce n'est malheureusement pas le cas. Le matériau terre a été délaissé au bénéfice de matériaux davantage manufacturés produits à partir de ressources extraites dans des pays souvent lointains. Cette exploitation inconsidérée des ressources et la centralisation du capital, associées à une production à forte consommation d'énergie, sont non seulement synonymes de gaspillage, mais en plus elles polluent l'environnement et entraînent une hausse du chômage (Minke, 2006).

Quoi qu'il en soit, le thème de l'économie circulaire est devenu prépondérant ces dernières années et la construction en terre crue connaît également chez nous un regain d'intérêt.

L'utilisation du matériau terre crue, en tant que ressource abondante et locale, pourrait contribuer à cette transition vers une économie circulaire. En effet, à la fin de son cycle de vie, ce matériau est totalement exempt de déchets, et réutilisable voire biodégradable, car il ne subit aucune modification chimique lors de son utilisation (OGIC, 2021). Il s'agit d'un mélange d'argile, de sable, de limon et parfois de graviers et cailloux. Ce mélange peut être transformé en matériau de construction selon différentes méthodes que ce soit en adobe, en bauge, en torchis ou en pisé.

Il existe aussi, dans nos régions, un énorme potentiel d'utilisation des terres excavées qui sont, dans les législations, considérées comme des déchets. L'utilisation de ces terres-déchets pourrait encore davantage renforcer la transition circulaire du secteur de la construction par la valorisation d'un déchet. Et, ce faisant, limiter l'exploitation d'une ressource naturelle, même si celle-ci est abondante, et surtout conserver des espaces et des paysages exempts de toute industrie, au bénéfice de la biodiversité.

En Europe, des tentatives ont même été faites pour appliquer le principe de l'économie circulaire à la gestion et à la valorisation des terres excavées. Il est cependant difficile de réglementer et de généraliser du fait que chaque pays et chaque région ont des réglementations différentes quant à la gestion et à la réutilisation de ce type de déchet. En Wallonie, la valorisation des terres excavées peut s'avérer compliquée étant donné les règles d'utilisation. Le décret du 14 juin 2001 (SPW, 2001) fixe les exigences environnementales qui déterminent la valorisation des déblais de chantiers en Wallonie (Pollet & Hanoteau, 2018).

Une expérience de 15 ans et plus de 1.350 analyses réalisées sur les stocks de terre excavées des chantiers dans la Wallonie montrent que 70% des terres ne pouvaient pas être réutilisées sur d'autres sites que celui de l'extraction, car comme elles ne répondaient pas aux exigences qui s'appliquent aux sols non contaminés, elles ne pouvaient pas être valorisées sans prétraitement dans une zone non industrielle (Pollet & Hanoteau, 2018). Ces 70% sont donc considérés comme des déchets et représentent un énorme potentiel pour être transformés et réutilisés comme matériau de construction.

En Wallonie, c'est une entreprise nommée Walterre qui est chargée de s'occuper des terres excavées des chantiers et des mouvements de terre en général. Walterre est un consortium qui a été reconnu en 2019 par le Gouvernement wallon comme opérateur responsable des tâches de contrôle de la qualité des terres et de l'autorisation des mouvements de terrain en Wallonie. Cela se fait sous la supervision du service public wallon SPW. Sur la figure 2, le contrôle est expliqué, il apparaît que l'une des tâches principales de Walterre est la certification du contrôle de la qualité des sols, pour laquelle des certificats de contrôle sont délivrés après que toutes les étapes de contrôle requises ont été effectuées. L'entreprise a également mis au point un système de traçabilité des mouvements de terrain. Les mouvements de terrain doivent être autorisés au préalable et le système permet de les suivre pendant toute la durée des travaux. Walterre traite les différentes données et les met à la disposition des autorités. Ces données servent avant tout de contribution à la base de données pour informer sur l'état des sols (asbl Walterre, 2022).

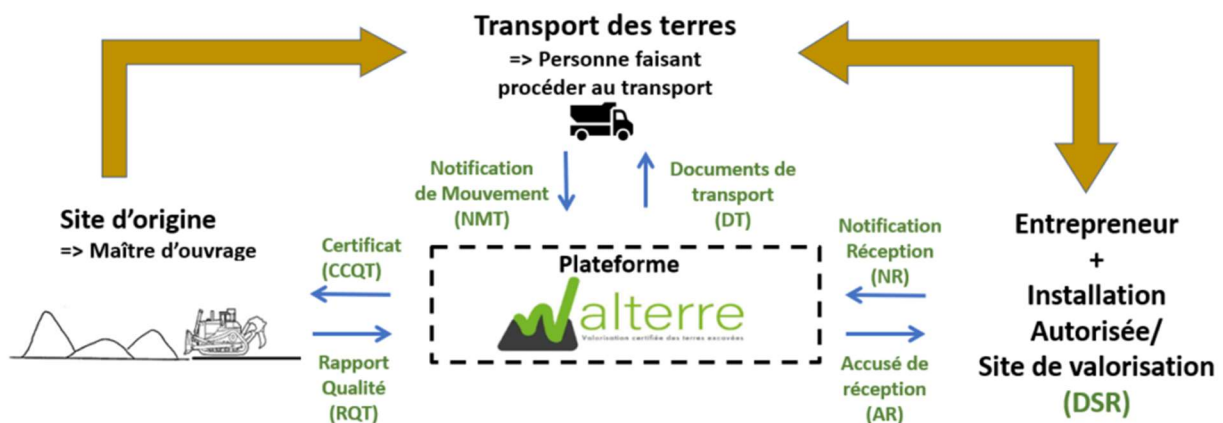


Figure 2 : Organisation Walterre (asbl Walterre, 2022)

Aujourd'hui, de plus en plus d'architectes et de scientifiques s'intéressent à ce sujet et à la question de savoir quel matériau de construction peut être l'argile. Des architectes, dont certains ont remporté le célèbre prix Pritzker, ont déjà construit des bâtiments remarquables, en partie en terre crue. Parmi eux, Amateur Architecture Studio en Chine, Renzo Piano en Italie ou Herzog & de Meuron en Suisse (Loiret, 2021). Mais lorsqu'il est question de construction en terre, on parle toujours de Martin Rauch dans les pays d'Europe occidentale. L'entrepreneur y est considéré comme le « pape de l'argile » (Kapfinger & Sauer, 2017).

Martin Rauch, mais aussi des architectes et des entreprises, comme l'entreprise BC materials basée à Bruxelles, tentent de développer de nouvelles techniques, plus rapides et plus simples que la construction traditionnelle en terre crue.

BC materials essaie d'utiliser les terres de déblais des chantiers pour ses produits parce que cette terre est difficile à transporter et à stocker.

Chaque année, environ 37 millions de tonnes de terre sont excavées en Belgique. Environ 70% de cette terre sont considérés comme un déchet, qui est mis en décharge ou enterré dans différents points de collecte. C'est pourquoi BC materials a décidé d'utiliser cette terre qui représente un énorme potentiel (BC materials, 2018).

Étant donné qu'en Wallonie, la terre excavée est en grande partie considérée comme un déchet, cette terre potentiellement précieuse a également un impact énergétique négatif. Si cette terre pouvait être utilisée comme ressource pour la production de matériaux de construction, le bilan environnemental s'en trouverait amélioré et des matériaux de construction plus énergivores pourraient être économisés. Cela suppose bien sûr que ces sols soient disponibles en quantités suffisantes et qu'ils puissent être utilisés pour différents types et méthodes de construction.

Dans ce contexte, je me pose la question suivante : Est-il possible de reproduire le modèle de BC materials en Wallonie en utilisant la terre excavée comme nouvelle ressource pour la fabrication de matériaux de construction en terre ?

L'ambition de ce travail est donc d'évaluer la nature des terres excavées en Wallonie, de les caractériser et d'identifier leur possible réutilisation. Ensuite, par des calculs hypothétiques, nous verrons quel est le potentiel de transformation de la terre directement sur le chantier et, d'autre part, comment ce potentiel évolue si l'on récupère la terre excavée et si l'on pré-produit des matériaux de construction dans des usines de production.

Et donc - ***quel est le potentiel d'utilisation des terres excavées en Wallonie pour la production locale de matériaux de construction en terre crue ?***

Méthodologie

Le travail de recherche s'établira en cinq parties, chaque partie répondant à un objectif du travail.

La première partie consistera à introduire le sujet. Elle aura pour objectif d'expliquer la situation actuelle dans le secteur de la construction. Elle se divisera en deux chapitres. D'une part, la situation actuelle dans le secteur de la construction sera décrite, à savoir qu'aujourd'hui beaucoup de déchets sont produits par le secteur de la construction. D'autre part, l'économie circulaire sera présentée et définie et, dans ce contexte, l'objectif de passer d'une économie linéaire à une économie circulaire.

La deuxième partie consistera à présenter la terre crue comme matériau de construction. Cette partie se divisera en deux chapitres distincts. Le premier décrira quelle terre est utilisée comme matériau de construction et quelles sont les caractéristiques et les avantages de cette terre. Le second explicitera les différentes méthodes utilisées pour transformer la terre crue en matériau de construction. Ce chapitre se divisera à nouveau en deux parties : les anciennes méthodes traditionnelles et les nouvelles méthodes qui ont été développées ces dernières années pour rendre la construction en terre plus rapide et plus moderne.

La troisième partie décrira dans un premier temps, de manière générale, l'histoire de la terre crue et expliquera que ce matériau de construction accompagne l'humanité depuis le début, puisqu'il s'agit du matériau de construction le plus ancien de l'humanité. Puis, les architectes et entreprises qui ont développé de nouvelles méthodes de construction seront présentés ainsi que des projets réalisés avec ces nouvelles méthodes. Cette partie a pour but de montrer les méthodes qui sont aujourd'hui possibles et qu'il est ainsi devenu plus facile de travailler avec le matériau « terre ». Cette partie est divisée en plusieurs chapitres. Tout d'abord, la présentation de l'entreprise BC materials avec l'analyse de ses produits et les projets qu'elle a accomplis. Le chapitre suivant présentera Martin Rauch, sa méthode de préproduction, la terre qu'il utilise et les projets qu'il a réalisés dans ce contexte. D'autres personnes ou entreprises seront éventuellement présentées dans d'autres chapitres.

La quatrième partie consistera à analyser et à évaluer le stock de terres excavées en Wallonie. Cela dans le but de déterminer quelle part de la terre en Wallonie ainsi que des terres excavées représente un potentiel de transformation en matériau de construction. Cette partie sera divisée en deux chapitres, l'un consacré à l'analyse et à l'évaluation, l'autre à l'explication du potentiel éventuel. Dans cette partie, il est important de consulter et de trouver les bonnes données. Ces données proviendront probablement principalement de l'entreprise Walterre et du Service public de Wallonie. Il est ensuite nécessaire d'effectuer des calculs hypothétiques afin de déterminer quel potentiel représente l'excavation pour la production de matériaux de construction en terre crue. Dans cette partie, il sera peut-être nécessaire de collaborer avec des personnes compétentes de Walterre ou de BC materials et peut-être de solliciter leur aide.

Enfin, **la cinquième et dernière partie** consistera à réaliser une analyse comparative des parties précédentes. L'objectif sera ici de répondre à la question de savoir si la terre, considérée comme un déchet en Wallonie, peut être utilisée pour la production locale de matériaux de construction en terre crue. Il sera important de connaître tous les faits, que ce soit la terre utilisée ou les différents processus de préproduction. Il faudra veiller à tirer les bonnes conclusions.

Structure du travail

L'idée de ce travail est née de la lecture de différents articles sur la terre crue et les matériaux de construction en terre crue. Les nombreux avantages qu'offrent ces matériaux ont semblé particulièrement fascinants. Les aspects circulaires et sanitaires, en particulier, font de la terre crue une option extrêmement intéressante dans le domaine de la construction. La question s'est alors posée de savoir pourquoi les matériaux de construction en terre crue n'étaient qu'un produit de niche, qui n'attirait guère l'attention dans le secteur de la construction, alors qu'il présentait tant d'avantages. En poursuivant les recherches, il s'est avéré que la plupart des artisans et des entreprises ne proposaient pas de matériaux de construction en argile et n'étaient pas formés aux différentes méthodes. Après quelques recherches, la question s'est alors posée de savoir si les déblais produits sur les chantiers, généralement considérés comme des déchets, ne pourraient pas être utilisés pour la production de matériaux de construction en terre crue. Cela aurait l'avantage de réduire ces déchets ainsi que de désengorger les centres de traitement des déchets tout en travaillant davantage avec des matériaux de construction écologiques et circulaires. Cette idée a conduit à la réflexion sur l'opportunité de réutiliser immédiatement les déblais sur le chantier. Il s'agissait de savoir si le potentiel quantitatif de la terre était suffisant et s'il était possible de produire les matériaux directement sur place. En même temps, l'idée a été envisagée que si la première étude montrait que ce potentiel était trop faible, il serait intéressant de transformer la terre collectée dans les différents centres de déchets en matériaux de construction dans une installation de production et de les distribuer ensuite.

Cette étude est motivée par le fait qu'il est désormais largement reconnu que le secteur de la construction a un impact négatif considérable sur l'environnement, notamment en raison de la consommation de grandes quantités d'énergie et de matières premières lors de la production de matériaux tels que le béton. Il est urgent de repenser le secteur de la construction, c'est pourquoi il a semblé particulièrement intéressant d'analyser l'aspect de la construction en terre crue et d'étudier le potentiel des terres excavées en Wallonie. Cette approche ouvre la possibilité de promouvoir des matériaux de construction durables et respectueux de l'environnement afin d'avoir un impact positif sur l'environnement et sur le secteur de la construction en général.

Pour l'analyse et la recherche, des informations ont été recueillies auprès de différentes sources.

Parmi les sources utilisées, on peut citer :

- Pour les caractéristiques de la terre, les méthodes de construction et les compositions pour la construction en terre crue, les informations ont été obtenues principalement auprès de Martin Rauch et de son entreprise « Lehm Ton Erde », de BC materials, de CRAterre et de la Confédération de la construction en terre crue.
- En ce qui concerne la nature de la terre en Wallonie, ce sont surtout les données du Service public de Wallonie (SPW) et du site « Géoportail de la Wallonie » qui ont été utilisées.
- Les chiffres relatifs aux déplacements de terre en Wallonie, qui seraient éventuellement susceptibles d'être transformés en matériaux de construction en terre, ont été obtenus à partir des rapports annuels de l'entreprise Walterre.
- Dans les tableaux Excel annuels de « statbel - La Belgique en chiffres », on peut trouver les chiffres des demandes de permis de construire approuvées.
- Le projet « Cycle Terre » en France, qui collecte les déblais des chantiers locaux, les trie dans des usines spécialement construites et les transforme en matériaux de construction en terre, a également servi de source d'inspiration pour ce travail.

Ces multiples sources ont fourni les informations nécessaires pour analyser le potentiel d'utilisation des terres excavées pour la production locale de matériaux de construction en terre crue en Wallonie.

Etat de l'art

Les anciens bâtiments comme le célèbre palais de l'Alhambra ou la Grande Mosquée de Djenné ne sont pas les seuls à être construits en terre crue. Aujourd'hui, de plus en plus de bâtiments modernes le sont également. La nouvelle Orangerie, construite au cœur d'Ydéal Confluence à Lyon en est un premier exemple. Le projet a été initié par OGIC et conçu par le cabinet d'architectes Clément Vergély Architectes. OGIC est une organisation française dont l'objectif est d'œuvrer pour le développement durable dans le domaine du logement et de l'urbanisme. La volonté d'OGIC de construire l'Orangerie en terre crue a posé un défi technique à l'architecture du bâtiment, qui compte 1000 m² de bureaux sur deux étages plus le rez-de-chaussée. La technique utilisée a consisté à comprimer ce matériau qu'est l'argile entre deux panneaux de coffrage de la manière la plus compacte possible pour former des blocs. La façade en pisé est la structure porteuse du bâtiment, complétée par une ossature en bois intérieure. Il s'agit d'une prouesse artisanale et d'une démonstration de l'avenir de la terre crue dans les zones urbaines (OGIC, 2021). Ce projet prouve que le matériau de construction qu'est la terre n'est pas seulement adapté aux petits projets d'habitation, mais qu'il peut encore être utilisé aujourd'hui pour des bâtiments plus importants.



Figure 4 : Le palais de l'Alhambra (Escape Away, 2023)



Figure 3 : La Grande Mosquée de Djenné © Paule Seux (Jean, 2021)



Figure 5 : La nouvelle Orangerie à Lyon (Clément Vergély architectes, 2021)



En 2016, le TERRA Award a été décerné pour la première fois. Créé par l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, l'organisation CRATerre et le centre de recherche et d'expérimentation amàco, le TERRA Award constitue le premier prix mondial d'architecture contemporaine en terre. Dominique Gauzin-Müller, la coordinatrice du TERRA Award, a ensuite présenté 40 projets parmi les 357 candidats dans son livre « L'architecture en terre aujourd'hui ». Ces exemples provenant du monde entier ont pour but d'inspirer la redécouverte de ce matériau de construction courant, peu coûteux et économe en énergie, qui constitue ainsi une contribution importante à la transition écologique et sociétale (Gauzin-Müller, 2018). Parmi ces projets, on trouve par exemple la « Maison dans la vallée de Cardona » à Wanaka, en Nouvelle-Zélande (Figure 6). Ce projet, qui est une ode au contraste entre la massivité et la transparence, a été construit par une jeune famille avec les architectes d'Assembly Architects Limited ainsi que les architectes Justin et Louise Wright. La maison se compose de trois volumes orientés différemment afin de profiter des différentes vues sur le paysage montagneux. Le pisé des éléments porteurs a été fabriqué sur place et renforcé par un système de tirants précontraints en acier qui devrait garantir une plus grande stabilité en cas de séisme (Gauzin-Müller, 2018).



Figure 6 : Maison dans la vallée de Cardona (Gauzin-Müller, 2018)

Un autre exemple est la piscine municipale de Toro, en Espagne. L'argile extraite sur place a été renforcée par du sable et du gravier. En plus, elle a été stabilisée avec de la chaux et du ciment blanc afin de résister à une pression de 2MPa. Un additif liquide imperméable a été ajouté au mélange en raison de l'humidité et de la chaleur à l'intérieur de la piscine. Une peinture fongicide, anti-algues et hydrofuge à base organique scelle la surface. Ce projet, conçu par les architectes Antonio Raya, Cristobal Crespo, Santiago Sanchez et Enrique Antelo, souligne une fois de plus les nombreuses possibilités d'utilisation du matériau « terre crue » (Gauzin-Müller, 2018).

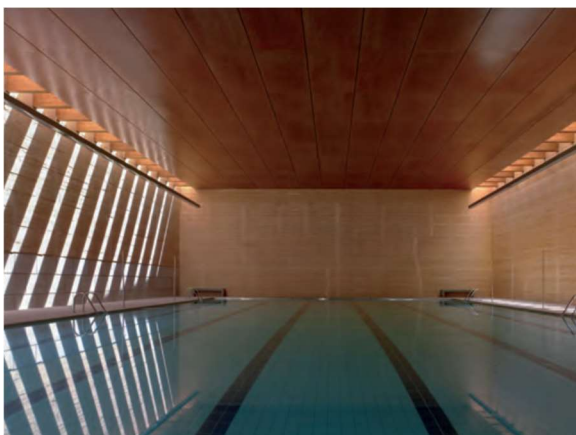


Figure 7 : La piscine municipale de Toro (Gauzin-Müller, 2018)

Le matériau « terre crue » ne présente pas seulement un avantage environnemental et circulaire, il présente également des caractéristiques physiques et hygrothermiques qui contribuent à créer une ambiance intérieure de plus grande qualité, notamment grâce à sa capacité à absorber et à stocker l'humidité excédentaire de l'air ambiant. Dès que l'air ambiant peut à nouveau absorber de l'humidité, la terre restitue la vapeur d'eau à l'air ambiant. Cet effet, provoqué par les minéraux argileux de l'enduit d'argile, est appelé « capacité de sorption » (Eder, 2017). De plus, le matériau « terre » améliore l'air ambiant et a une influence positive sur le confort climatique. Il peut diminuer le bruit, créer des effets de chaleur ou de froid selon la saison et réduire les besoins de ventilation en régulant mieux l'humidité de l'air et en neutralisant les odeurs (BC materials, 2018). Il faut également noter que la construction en argile ou terre crue est bénéfique pour la santé, car elle est naturelle, non toxique et ne dégage pas non plus de substances toxiques. En outre, l'argile est antistatique et atténue les radiations (BC materials, 2018). Un dernier avantage important est que ce matériau de construction est disponible localement presque partout, ce qui réduit les coûts de transport et donc l'énergie grise à un minimum (BC materials, 2018).

La terre est utilisée depuis très longtemps par les hommes pour construire leurs habitations. Au cours de cette longue période, ceux-ci ont développé différentes méthodes de construction en terre, qu'ils ont adaptées à des formes architecturales et à des fonctions tout aussi variées. Cette variété de bâtiments différents est donc le résultat de bonnes pratiques différentes. Les techniques de construction à base de terre crue ont été et sont toujours très variées et continuent d'évoluer. En quelques années, ce matériau, devenu un solide objet d'intérêt scientifique, et donc un matériau d'avenir, n'est plus considéré comme un matériau de construction « dépassé », voire « exotique » (Confédération de la construction en terre crue, 2020).

En France, il existe une « Confédération de la construction en terre crue » qui a pour but de promouvoir et de défendre la construction en terre crue, de réunir les professionnels et de soutenir les recherches dans ce domaine. Pour ce faire, les membres ont rédigé différents « Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue ». Ils y décrivent et expliquent six pratiques différentes de la construction en terre crue :

1. La bauge ;
2. Les enduits en terre ;
3. Le pisé ;
4. Les torchis ;
5. La terre allégée ;
6. Les briques en terre crue.

Ces guides sont normatifs et leur objectif est de créer une relation de confiance entre les différents acteurs de la construction de maisons en terre crue. De plus, ils peuvent aider à évaluer la qualité des constructions. Le succès des constructions en terre repose sur la réalisation commune de projets, précédée d'une base commune. C'est à cela que doivent servir ces guides des bonnes pratiques (Confédération de la construction en terre crue, 2020).

En Belgique, l'entreprise BC materials a développé un concept de réutilisation des terres d'excavation et de déblais pour la fabrication de blocs en terre crue. Chez eux, cette brique s'appelle la « brickette ». Celle-ci, fabriquée à partir de terre d'excavation non polluée et non transformée provenant de différents chantiers, se compose donc de terre comprimée circulaire. BC materials mélange pour cela de l'argile yprésienne et du sable de Bruxelles, provenant en grande partie de différents chantiers de la Région de Bruxelles-Capitale. Selon les besoins, le mélange est encore stabilisé avec 4 % de chaux hydraulique (BC materials, 2022). Ces briques, qui peuvent être utilisées pour des murs porteurs ou non porteurs, sont fabriquées avec **600 fois moins d'énergie** que les briques cuites traditionnelles (BC materials, 2018). L'entreprise fait toujours tester la pollution de ses ressources de terres par un laboratoire indépendant. BC materials n'utilise par conséquent que des terres non perturbées et non

polluées. Afin d'obtenir des matériaux de construction durables et performants, l'entreprise mélange des sols provenant de différents sites, et donc de différentes couches géologiques (BC materials, 2018).

Mais il n'y a pas que les briques brutes qui peuvent être préfabriquées. L'Autrichien Martin Rauch, cité précédemment, a développé un procédé qui lui permet de préfabriquer des murs en pisé. En 2016, le TERRA Award lui a décerné un prix spécial pour l'ensemble de son œuvre. Grâce à une innovation technologique et esthétique, l'Autrichien révolutionne depuis plus de 25 ans un savoir millénaire (Gauzin-Müller, 2018). Avec son procédé de préfabriquer des murs en pisé, il réagit aux processus de construction habituels actuels. Une production sur place n'est souvent pas possible en raison des délais de construction plus courts. Grâce au développement de la préfabrication, il est possible de réaliser des projets qui ne seraient pas réalisables par une production sur place. Mais la préproduction présente encore d'autres avantages. Non seulement elle contribue à une production indépendante des conditions météorologiques, mais elle réduit également les temps de travail sur le chantier et permet de calculer précisément les délais. Un autre avantage est que le temps de séchage des éléments se réalise entièrement en usine. Cela permet d'introduire de façon optimale les processus de construction industrialisés et les différentes étapes de travail peuvent être optimisées et rationalisées grâce à des systèmes modulaires. Si le chantier est bien accessible, il est même possible de déplacer des éléments pesant jusqu'à 7000 kg à l'aide d'une grue. Pour la préproduction, Rauch et son équipe utilisent de la terre provenant d'un rayon de 10 kilomètres seulement. La préfabrication permet d'optimiser le travail de détail en atelier, ce qui contribue à atteindre un haut niveau de personnalisation (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2018). Son concept industriel ouvre ainsi de nouvelles perspectives à la construction en terre crue. Quatre des bâtiments construits avec ses modules préfabriqués figuraient parmi les finalistes du TERRA Award 2016 (Gauzin-Müller, 2018). L'un d'entre eux était par exemple le centre des herbes de l'entreprise Ricola, érigé en 2013 et conçu par le bureau d'architectes Herzog & de Meuron. Ce bâtiment a été construit à l'aide de murs préfabriqués en terre battue de Martin Rauch. Le procédé de préfabrication a permis de poser 666 blocs de pisé en 5 mois (Mack, 2014).

Si ces techniques et procédés étaient mieux connus et si davantage d'architectes et d'entreprises les utilisaient, la terre excavée pourrait, en Wallonie aussi, se voir attribuer une nouvelle fonction.

Ces « déchets de terre » pourraient acquérir une nouvelle valeur en étant transformés en un matériau de construction précieux.

La situation actuelle

L'« activité humaine » est mesurée par le produit intérieur brut (PIB). Il s'agit d'une unité de mesure monétaire qui détermine la valeur marchande de tous les produits et services qui ont été produits au cours d'une année. Cet indicateur approximatif permet d'évaluer le niveau économique d'une nation. Le principe est que plus la croissance est importante, mieux c'est. Grâce au PIB, le temps est commercialisé en heures de travail et la participation humaine aux services est réduite au minimum. La justice, les soins, l'écologie, l'égalité, le partage, tout ce qui ne peut pas être compté est exclu de l'équation du PIB. Cette perspective conduit à une augmentation progressive de la productivité humaine, à une surcroissance. On ne tient pas compte du fait que ce système entraîne des conséquences à long terme, par l'extraction et l'exploitation des ressources naturelles, sociales et humaines (De Cooman, 2020). Le secteur de la construction et de l'exploitation des bâtiments dans l'Union européenne représente, selon la Commission européenne, environ la moitié de la production totale de matériaux et un tiers de la consommation d'eau. Si d'énormes progrès ont été réalisés ces dernières années en matière d'efficacité énergétique des bâtiments, le secteur de la construction reste néanmoins l'un des plus gros consommateurs d'énergie. Les bâtiments en Europe, à l'origine de 36% des émissions de CO₂, consomment environ 40% de la demande totale d'énergie. En outre, le secteur de la construction génère environ un tiers de l'ensemble des déchets. Ces chiffres élevés résultent du fait que **le secteur est lié à tous les impacts environnementaux qui se produisent au cours des différentes phases du cycle de vie d'un bâtiment**. Cela inclut la fabrication des éléments de construction, la construction des bâtiments, l'utilisation, les travaux de rénovation et le traitement des déchets de construction (Romnée & Vrijders, 2018). D'autres chiffres intéressants sont énumérés dans la figure 8 ci-dessous.

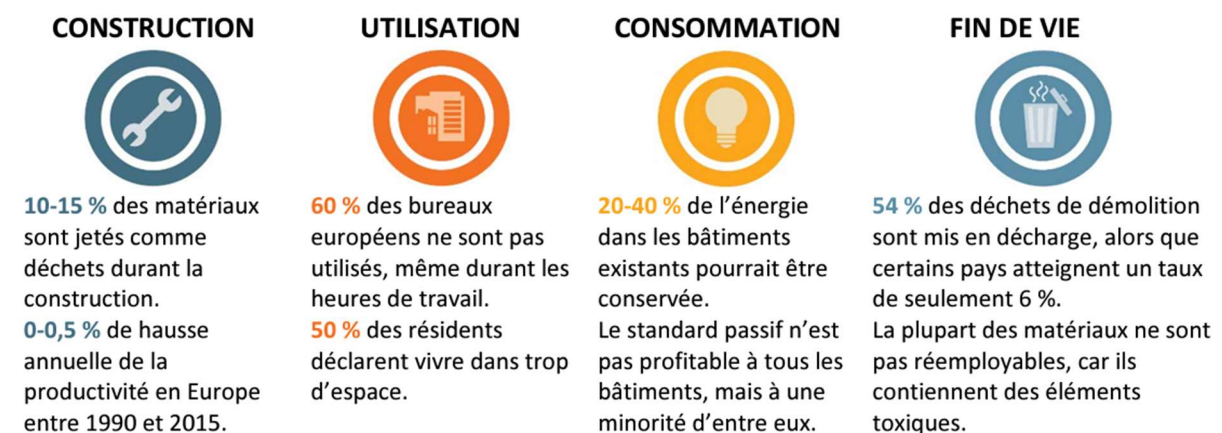


Figure 8 : Production de déchets aux divers stades de vie d'un bâtiment (Romnée & Vrijders, 2018)

Un grand nombre de personnes croient encore que le savoir scientifique et les technologies qui l'accompagnent trouveront une solution et rendront possible ce modèle de survie sur notre planète limitée. Pourtant, aucune innovation technologique ne peut venir à bout de ce modèle. Il y a une faille dans le système, qui est de nature structurelle et systémique. Le changement dont nous avons besoin est de nature culturelle (De Cooman, 2020). Il faut que l'industrie de la construction commence à penser différemment afin de ne pas se limiter au PIB et à la performance, mais plutôt d'établir un système circulaire au lieu d'un système linéaire.

L'économie linéaire

L'économie linéaire existe depuis le début de l'ère industrielle. Elle consiste à extraire des matières premières qui sont transformées en matériaux et simplement jetées après leur utilisation. Le modèle économique linéaire est donc basé sur le principe « extraire - fabriquer - consommer – jeter », et chacun de ces processus nécessite de l'énergie, consomme des ressources et produit des déchets (Romnée & Vrijders, 2018). Le monde de la fabrication se trouve dans un cercle vicieux. Malgré les progrès technologiques, les prix des ressources ont tendance à augmenter, il est difficile de prévoir les coûts de production et, de manière générale, le marché est incertain. Il faut chercher d'autres possibilités car, à plus ou moins long terme, la rentabilité et la viabilité en dépendent. L'économie linéaire, où personne ne se soucie de l'épuisement des ressources, commence après 150 ans d'industrialisation à mettre les gens sous pression (Lanoie & Normandin, 2015).

L'économie circulaire



Figure 9 : Economie circulaire (Union européenne, 2020)

Quant à l'économie circulaire, elle cherche à savoir comment les différents matériaux, composants et produits sont utilisés à la fin de leur cycle de vie, mais aussi comment ces éléments sont fabriqués et utilisés. Elle tente de préserver le capital naturel à toutes les étapes. L'objectif est de pouvoir utiliser durablement les différents produits, leurs composants et matériaux au sein du système, ou du moins de les garder en circulation le plus longtemps possible (Figure 9) et de réduire ainsi les déchets au minimum. Pour ce faire, on encourage la réutilisation, la réparation, la remise à neuf, la fabrication ou la récupération de composants, le recyclage et la valorisation énergétique des matériaux. Même après la fin de vie d'un produit, on essaie de conserver les ressources et les matériaux le plus longtemps possible dans l'économie et de les réutiliser de manière productive afin de continuer à générer de la valeur ajoutée. Bien entendu, ce modèle économique consomme également de l'énergie, utilise des ressources et produit des déchets à chaque étape de la chaîne de création de valeur, mais plus les mesures prises sur le produit permettent de conserver les matériaux, plus ces consommations sont faibles (European Parliament, 2023 ; Romnée & Vrijders, 2018).

Dans le secteur de la construction, les principes de l'économie circulaire reposent sur trois facteurs principaux, qui présentent des défis mais aussi des opportunités :

1. Dès le début de la conception du bâtiment, la question de savoir comment les matériaux peuvent être récupérés ou recyclés à la fin de leur vie est abordée. Les bâtiments sont conçus et construits en conséquence.
2. « Urban mining » : Dans l'économie circulaire, les bâtiments existants sont considérés comme des mines urbaines dont les matériaux et les déchets peuvent servir de ressources.
3. De nouveaux modèles d'affaires apparaissent, qui favorisent la création de valeur tout au long du cycle de vie des bâtiments et des matériaux et qui créent de la valeur à partir des déchets (Romnée & Vrijders, 2018).

Pour mettre en place ce système de l'économie circulaire, il faut du temps pour que les professionnels de la construction puissent non seulement acquérir des connaissances, qui viennent en faisant, en collaborant et en apprenant, mais également se familiariser avec les nouveaux systèmes, matériaux et méthodes de construction possibles. Il est nécessaire que le secteur de la construction revienne sur ses pas et comprenne la relation étroite qui existe entre la source, les ressources et les matériaux de construction qui constituent nos bâtiments (De Cooman, 2020).

De l'économie linéaire à l'économie circulaire avec la terre

La terre présente de nombreux avantages. Ceux-ci seront décrits plus en détail dans un autre chapitre. Mais l'un des principaux avantages de la terre est la faible quantité d'énergie nécessaire à la production de matériaux de construction. De plus, la terre répond à l'un des principaux critères de la construction écologique, car elle constitue un cycle de vie qui s'auto-entretient (Figure 10).

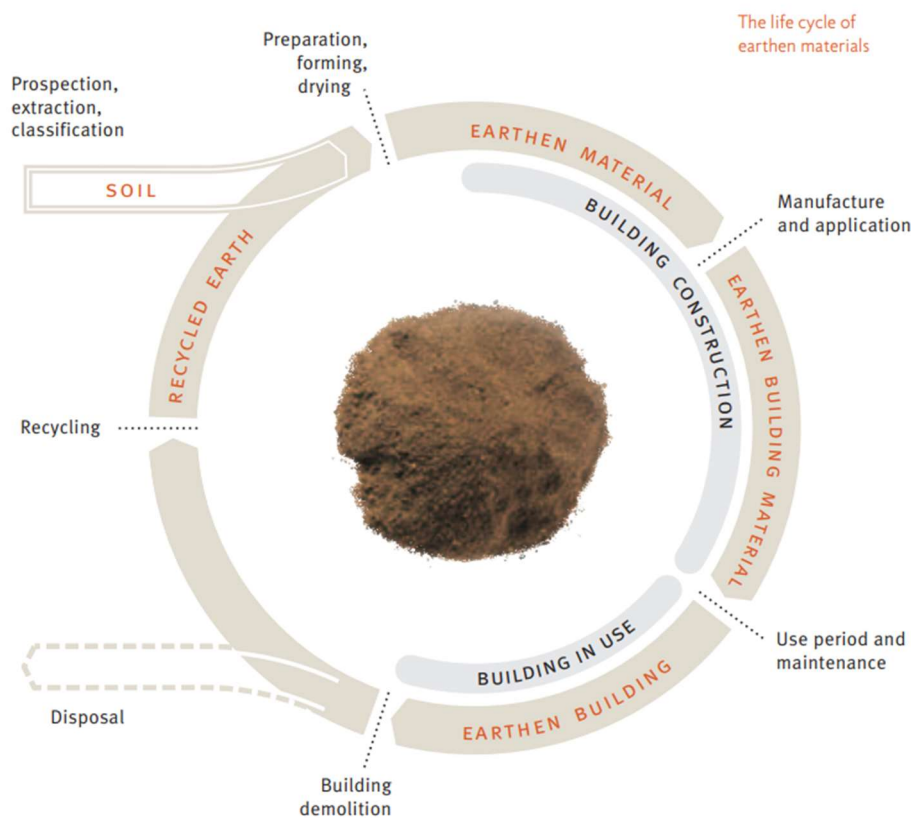


Figure 10 : Cycle de vie des matériaux en terre crue (Schreckenbach, 2004)

Après avoir été utilisée comme matériau de construction, la terre peut être facilement démontée et recyclée, soit pour être réutilisée comme matériau de construction, soit pour être simplement rendue à la terre. Le durcissement de la terre ne nécessite pas d'énergie supplémentaire, mais seulement un peu de patience, car elle sèche et durcit à l'air. Avec l'aide de l'eau, elle peut toujours être ramollie en une masse plastique, contrairement au béton et au ciment ou au plâtre et à la chaux. Cette propriété de durcissement et de ramollissement peut être répétée à l'infini, tant qu'aucun autre matériau n'est ajouté à la terre. Il s'agit d'une propriété particulièrement écologique du matériau, car elle permet de le recycler à l'infini avec un minimum d'énergie (Schreckenbach, 2004).

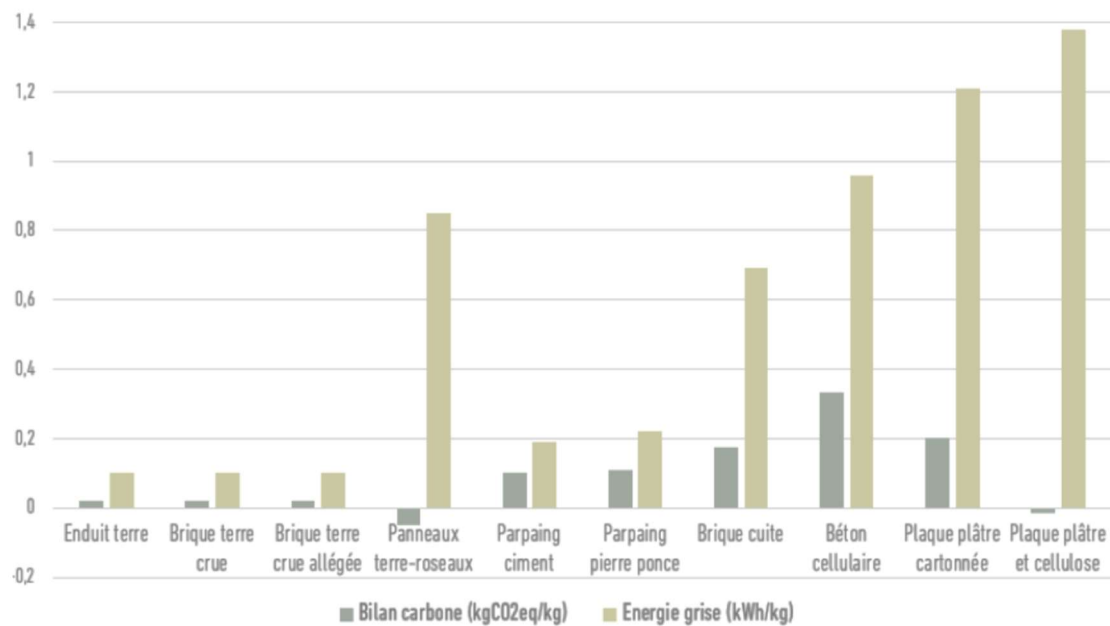


Figure 11 : Bilan carbone et énergie grise de la terre crue avec des matériaux stabilisés ou cuits (Lkhamrichi, 2022)

En outre, le bilan environnemental (Figure 11) montre une nette différence en faveur de l'argile par rapport aux matériaux cuits ou stabilisés habituellement utilisés dans la construction. La terre crue et le bois présentent le bilan carbone le plus faible (moins de 0,01 kg CO₂eq/kg) (Cabeza, Boquera, Chàfer, & Vérez, 2021). La fabrication de matériaux tels que le béton ou le ciment nécessite en outre une grande quantité de sable, ce qui cause un épuisement continu des ressources. Le sable et le gravier font partie des matériaux les plus extraits au monde. L'épuisement du sable et la raréfaction des ressources naturelles constituent donc un défi majeur pour le secteur de la construction, car ces ressources sont exploitées plus rapidement qu'elles ne peuvent se renouveler ou se créer, ce qui entraîne en outre la destruction de la biodiversité (Bendixen, Best, Hackney, & Inversen, 2019).

En 2018, un rapport d'état mondial avait été préparé par l'Agence internationale de l'énergie pour l'Alliance mondiale pour les bâtiments et la construction (GlobalABC) et coordonné par le Programme des Nations unies pour l'environnement. Ce rapport avait pour objectif d'orienter le secteur de la construction vers une efficacité énergétique élevée et des bâtiments à faible émission de carbone, réduisant ainsi l'impact environnemental grâce à un cycle de vie prolongé (GlobalABC, IEA, & UNEP, 2018). En outre, le GlobalABC « Roadmap for Buildings and Construction » avait mis l'accent sur la sensibilisation et l'éducation aux matériaux à faible émission de carbone tels que le bois et l'argile (GlobalABC, IEA, & UNEP, 2020). Le bilan environnemental positif de la terre crue et ses autres avantages correspondent aux recommandations du Global Status Report 2018 et la construction en argile pourrait aider à se **recentrer sur les matériaux locaux**, ce qui devrait redevenir une priorité.

La terre crue

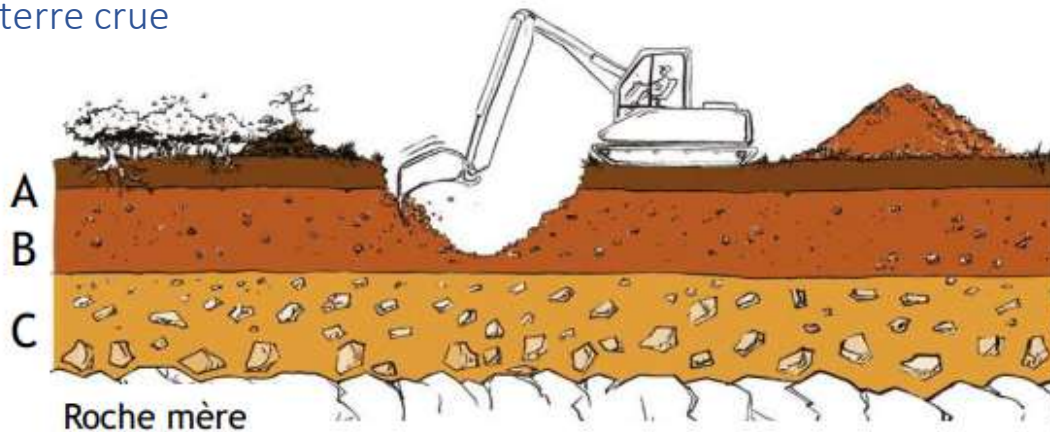


Figure 12 : Les horizons du sol © Pauline Sémon (Gauzin-Müller, 2018)

La terre constitue la surface supérieure de notre planète et est un produit d'altération naturelle de roches préfabriquées. L'argile d'altération désigne le limon et l'argile qui restent sur leur lieu d'origine. Les sols emportés par le vent, l'eau ou la glace sont appelés argiles morainiques ou sols loessiques (Schreckenbach, 2004). Le terme « argile » est utilisé pour désigner le matériau qui est important pour la construction en terre. Il s'agit d'un matériau qui est constitué de composants solides, liquides mais aussi gazeux. La terre utilisée pour la construction se trouve directement sous ce que l'on appelle la terre végétale. La Terre est, comme on peut le voir sur l'illustration, divisée en différentes couches appelées horizons. Le premier horizon (A) est la terre végétale. Cette couche ne convient pas à la construction, car elle abrite de nombreux organismes vivants et favorise la croissance des plantes. En dessous se trouve la couche de terre, qui est utilisée pour la construction. Sur l'illustration, il s'agit de l'horizon B. Cette couche se trouve à environ 20 à 30 cm sous la surface. En ce qui concerne les matériaux de construction, il faut faire la différence entre la terre cuite et la terre crue. Cette différence est établie en fonction des procédés de fabrication, des propriétés physiques et des effets sur l'environnement (Schreckenbach, 2004). Dans ce travail, nous nous concentrerons uniquement sur les matériaux en terre crue.

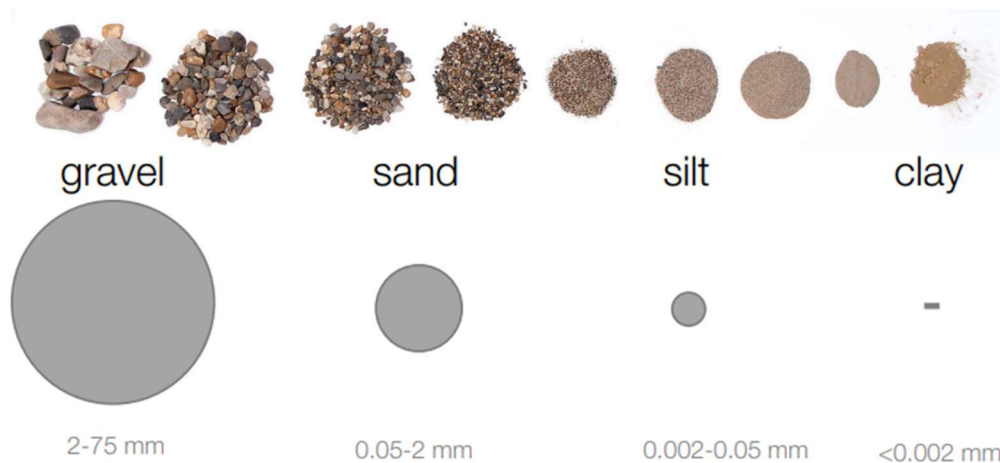


Figure 13 : Composants de la terre (Van der Linden, s.d.)

La terre est toujours constituée de plusieurs composants, de différentes tailles de sable, de gravier, de limon et d'argile (Figure 13). L'argile contenue dans la terre est particulièrement importante pour la fabrication de matériaux en terre. En effet, celle-ci contient des minéraux argileux, c'est-à-dire des particules microscopiques et attrayantes qui, en tant que liant, maintiennent ensemble les particules plus grandes de sable et de gravier dans le mélange de terre. Les composants les plus importants pour la fabrication de matériaux en terre sont donc surtout l'argile, mais la bonne quantité d'eau et la densité sont également responsables de la cohésion de la terre. Dans certains procédés, on ajoute encore différentes fibres, comme de la paille, ce qui peut contribuer à améliorer la cohésion de la terre (Van der Linden, s.d.).

Les avantages et caractéristiques

L'utilisation de la terre comme matériau de construction présente de nombreux avantages, que l'on retrouve dans les différents ouvrages qui traitent de ce sujet dont (BC materials, 2022 ; Ben-Alon L. , Loftness, Harries, & Hameen, 2020 ; Depret, 2015 ; Grigoletto, Paul, Lebeau, Courard, & Moutschen, 2015 ; Guillaud & Houben, 2015 ; Schreckenbach, 2004), etc.

Ces avantages, énumérés ci-dessous, sont de différentes natures.

Aspect environnemental

Dans les avantages de la terre, nombreux sont ceux de nature écologique, car la matière première est locale et abondante, circulaire et donc réutilisable à l'infini. Elle ne présente que de très faibles émissions de CO₂ et d'énergie grise. Contrairement à la plupart des autres matériaux de construction, la production de matériaux de construction en argile ne nécessite pas de combustibles fossiles ou de processus à forte consommation d'énergie, ce qui contribue également à ce que les travaux réalisés avec des matériaux de construction en argile n'engendrent que de très faibles émissions de CO₂. De plus, la production ne génère pas de déchets et la terre peut être transformée ou retournée à la terre à la fin de sa vie utile. En outre, l'argile ne contient pas de substances nocives pour la santé et peut même présenter des avantages non négligeables, notamment pour les personnes allergiques. Elle contribue au confort général, car elle a la capacité de réguler l'humidité et la température d'une pièce. Cette propriété offre des réponses aux défauts actuels des bâtiments en termes d'inertie et d'économie d'énergie. La densité élevée entraîne une inertie thermique qui est précieuse, car elle permet de stocker l'eau et de réguler les changements de température entre le jour et la nuit. En été, elle assure de ce fait le rafraîchissement et en hiver, la chaleur est stockée dans les murs et se dissipe lentement.

Aspect technique

Les avantages techniques sont très présents, qu'il s'agisse de l'inertie et des performances hygrothermiques déjà décrites ou encore de la résistance au temps, de la solidité, de la bonne résistance au feu et des performances acoustiques qui contribuent à réduire le bruit de la terre grâce à ses capacités d'absorption. Parmi les aspects techniques, il y a aussi son potentiel créatif et artistique. En l'occurrence, la terre nous interpelle, car la plupart des gens perçoivent les surfaces en terre comme très agréables à l'œil et au toucher, étant donné qu'il s'agit d'un matériau de construction si naturel. Il est possible de varier les différentes applications réalisables ainsi que les couleurs et les tons, grâce aux différentes teintes d'argile. En Belgique, on trouve par exemple souvent comme couleurs le jaune, le gris et le rouge, alors qu'en Allemagne et en France, beaucoup de tons blancs (De Cooman, 2022). La couleur est due aux différents minéraux contenus dans l'argile en question et qui sont les plus dominants. Ainsi, l'argile riche en fer est rouge, l'argile calcaire est plutôt jaune et celle contenant du manganèse est brune. La plupart des argiles contiennent cependant un peu de tout et ne sont donc pas de couleur pure (Fischer-Gertz, s.d.).

Parmi les aspects techniques, il y a aussi les propriétés qui peuvent varier en fonction des différents mélanges. Le type et la quantité de déblais ainsi que ceux des agrégats influencent ces propriétés. En voici quelques exemples : « l'argile grasse », c'est-à-dire l'argile avec une forte teneur en eau et en argile, augmente la résistance, mais se rétracte davantage, se fissure en séchant et est plus difficile à travailler que l'argile avec une plus forte teneur en sable (« argile maigre »). Il convient d'utiliser des galets ronds et concassés dans le mélange. Les différents graviers stabilisent l'argile battue de manière très différente. Les galets ronds se mélangent mieux à la masse, tandis que les matériaux concassés s'imbriquent mieux les uns dans les autres. Si l'on utilise davantage de gravier concassé, la terre battue sera plus stable. Il faut trouver un équilibre entre tous ces aspects, car le mélange doit toujours trouver un juste milieu entre les propriétés. Les différences peuvent souvent être très faibles. Une petite tendance peut permettre d'améliorer les propriétés du mélange (Kapfinger & Sauer, 2017).

D'autres facteurs jouent également un rôle important pour obtenir un bon résultat. Dans l'exemple de la terre battue, cela dépend aussi du stockage, de l'humidité de mise en œuvre, de la technique de coffrage et du compactage (Kapfinger & Sauer, 2017).

Aspect économique

La construction en argile est abordable, favorise l'économie locale, crée des emplois et pourrait ainsi contribuer à la réduction de la pauvreté, à l'autoconstruction et à l'entretien des bâtiments. Il y a également peu de coûts d'exploitation et de transport. De plus, les matériaux terreux ont une longue durée de vie et un grand avantage est qu'ils ne sont pas considérés comme des déchets à la fin de leur vie utile, mais peuvent servir de nouvelle ressource.

Raisons de la faible utilisation

Même si l'intérêt pour ce matériau a connu un certain regain ces dernières années, l'argile reste rare dans la construction au niveau européen. D'après l'expérience accumulée depuis plus de cinq ans, quelques raisons peuvent être :

- La méconnaissance des techniques par les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre.
- Un manque de références techniques et par conséquent un défaut de lisibilité.
- Un « savoir-faire » qui se perd de plus en plus chez les professionnels du bâtiment.
- Une surenchère actuelle des matériaux « artisanaux » par rapport aux matériaux « artificiels » dont l'énergie de transformation est plus avantageuse (Loiret, 2021).

A ces raisons s'ajoutent les **préjugés** qui perdurent dans nos régions. En voici quelques-uns qu'on peut lire dans la littérature internationale et belge, tirés de (Antoine & Carnevale, 2016 ; Ben-Alon L. , Loftness, Harries, Hameen, & Bridges, 2020 ; Depret, 2015 ; Guillaud & Houben, 2015 ; Hamard, Cazacliu, Razakamanantsoa, & Morel, 2016 ; Minke, 2006) :

- Dans l'esprit des gens, le matériau de construction qu'est la terre est souvent un matériau issu de la culture architecturale étrangère et plutôt des pays du sud. Pour beaucoup, les bâtiments construits en terre font immédiatement penser aux « huttes africaines » ou aux anciennes constructions du Maroc.
- Par conséquent, ce matériau de construction est souvent associé à la pauvreté et, dans l'esprit de nombreuses personnes, il s'agit d'un matériau de construction pour les pauvres ;
- Beaucoup pensent que la terre n'est pas un matériau de construction suffisamment résistant, qu'elle est fragile et faible, alors qu'elle peut supporter jusqu'à deux étages.
- « C'est un matériau qui n'est pas durable et résistant, car il ne résiste pas aux intempéries », mais s'il est bien conçu, les éléments en terre peuvent également être utilisés comme éléments de façade.
- La terre serait dépassée. Elle serait inférieure aux autres matériaux de construction et incompatible avec l'idéologie du progrès, car elle renvoie à d'anciens savoir-faire des régions rurales. La terre ne répondrait tout simplement pas aux critères de modernité et d'hygiène, car elle est souvent assimilée au mot « sale ».
- Beaucoup pensent que ce matériau de construction n'est utilisé que par des marginaux qui veulent vivre de manière alternative et se démarquer du monde moderne.

Les méthodes

Pendant des siècles, les techniques et les connaissances relatives à la construction en terre se sont surtout transmises oralement. Comme la construction en terre était autrefois le mode de construction dominant en Europe, il n'a probablement pas été jugé nécessaire d'écrire quoi que ce soit à ce sujet, raison pour laquelle les sources écrites sont aujourd'hui très rares. Des techniques locales de construction en terre crue ont néanmoins vu le jour. Celles-ci étaient si bien établies qu'elles se sont répandues même sans transmission réglementée et écrite. Les techniques se sont développées de manière aussi individuelle que les matériaux locaux sont différents (Kapfinger & Sauer, 2017).

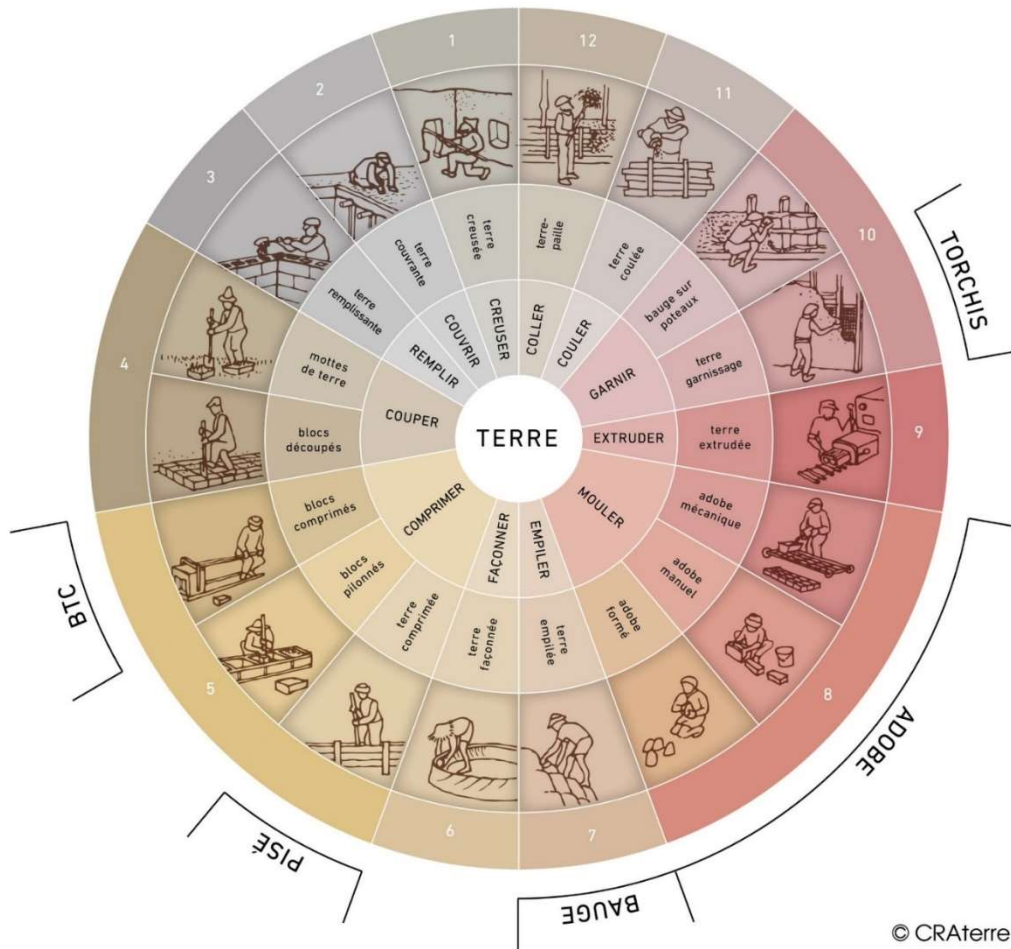


Figure 14 : Roue des 12 méthodes constructives © CRAterre (Guillaud & Houben, 2006)

Il existe douze méthodes principales d'utilisation de la terre crue dans le monde, avec au moins une centaine de variantes différentes. CRAterre a développé une roue qui relie ces 12 méthodes ainsi que 18 solutions constructives. Les méthodes sont énumérées en fonction de la quantité d'eau nécessaire à la fabrication des matériaux, de 1 = terre sèche, à 12 = terre liquide (Guillaud & Houben, 2006).

Les méthodes traditionnelles

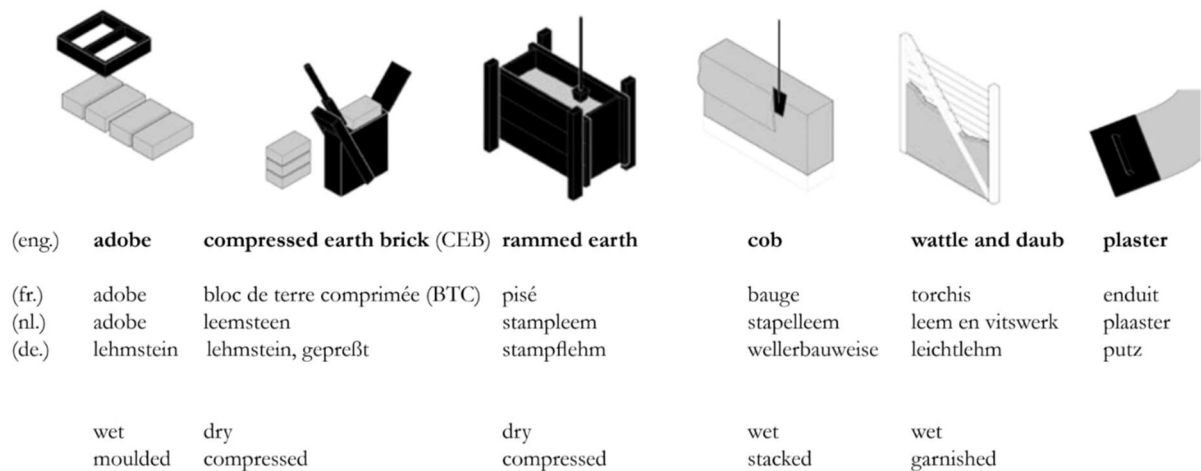


Figure 15 : Procédures de construction (Van der Linden, s.d.)

Techniques porteuses

- L'**adobe** est un type de brique de terre non cuite. Un mélange est versé dans un coffrage alors qu'il est encore souple et plastique. La brique doit ensuite sécher avant que le coffrage ne soit retiré. Le mélange de terre contient généralement des fibres comme de la paille et comprend de l'argile et du sable, mais pas de gravier. Les briques sont utilisées pour construire des murs après séchage (Van der Linden, 2019).
- Le **bloc de terre comprimée (BTC)** est un type de brique créé en appliquant une pression intense à un mélange de terre dans un coffrage pour former des briques. La presse peut être hydraulique ou manuelle. Le mélange de terre est souvent un peu sablonneux. Il ne doit pas y avoir de gravier. Elle doit être humide et ne contenir qu'une petite quantité d'eau lors de la compression (Van der Linden, 2019).
- Le **pisé** est une technique traditionnelle d'utilisation de la terre non cuite. La matière première « terre » est très variée et il existe de nombreux types de terres qui peuvent être utilisés pour la fabrication d'éléments en pisé. La terre peut par exemple être très argileuse ou contenir peu d'argile, beaucoup de gros éléments ou peu de gros éléments, etc. La fabrication doit simplement toujours être adaptée à la terre donnée (Confédération de la construction en terre crue, 2020). Le mélange pour le pisé est composé généralement d'agrégats, notamment de gravier, de sable, de limon et d'argile (Van der Linden, 2019). La meilleure terre est censée être composée de 0 à 15 % de gravier, de 40 à 50 % de sable, de 35 à 20 % de limon et de 15 à 25 % d'argile. Comme le rapportent de vieux pisteurs de la région d'Izeaux, la règle était autrefois de choisir une terre « rouge », non organique, pas trop humide mais pas trop sèche non plus, et de construire de préférence au printemps, lorsque la terre « travaille » ou « est dans son jus » (CRAterre, et al., 1979). Cette terre est ensuite placée dans un coffrage rigide avec une base stable, en couches de hauteur régulière, puis compactée. Auparavant, cette opération se faisait manuellement ; aujourd'hui, elle se fait généralement de manière mécanique, par un compactage dynamique ou un battage (Confédération de la construction en terre crue, 2020). Si les murs en pisé sont bien travaillés, ils ne forment qu'une seule pièce, et s'ils sont recouverts d'un bon enduit à l'extérieur, ils peuvent durer des siècles (CRAterre, et al., 1979).
- Pour la **bauge**, les terres limono-argileuses sont particulièrement adaptées, mais en fonction des ouvrages, des mélanges et des mises en œuvre, tout type de terres peut être utilisable. Il ne faut éviter que les terres qui contiennent de la matière organique et qui n'ont pas de cohésion. Pour la production du mélange de construction, de l'eau est mélangée à la terre ainsi que des fibres qui sont là pour augmenter la cohésion afin de faciliter la mise en œuvre, de limiter la fissuration lors du sciage et d'augmenter la résistance au cisaillement. En outre, des

granulats et des stabilisants sont ajoutés selon les besoins (Confédération de la construction en terre crue, 2020). Pour réaliser un mur, différentes couches de terre sont superposées. Entre chaque couche, il y a un temps de séchage. Le mur est donc réalisé par étape. Pour finir, la surface du mur est retaillée pour lui donner sa forme définitive. Les surépaisseurs apparues lors de la construction du mur sont ainsi éliminées et la surface est lissée. L'outil souvent utilisé pour le retaillage s'appelle un paroir. Il s'agit d'une sorte de bêche (Confédération de la construction en terre crue, 2020).

Les Techniques mixtes

- Le **torchis**, qui est l'une des techniques de construction en terre les plus utilisées, est apparue avec la sédentarisation des hommes. Le terme désigne à la fois le matériau et la technique. Il s'agit d'un ensemble de matériaux liés entre eux, associant la terre brute à des fibres végétales et à des poutres en bois. La technique consiste à combler les vides de la structure porteuse par ce mélange. Le mélange peut varier en fonction de l'utilisation. Il peut s'agir d'une terre contenant peu ou au contraire beaucoup d'argile (de maigre à gras). La terre est mélangée avec de l'eau et parfois des additifs selon l'utilisation. Cela peut alors être très différent et le mélange peut varier de plastique à visqueux ou limoneux, liquide à épais, selon les objectifs de performance souhaités (Confédération de la construction en terre crue, 2020).
- La **terre allégée** est une technique d'isolation acoustique et thermique non porteuse, inventée en Allemagne après la Première Guerre mondiale. Cette technique est basée sur le procédé du pisé et du torchis. Lors de la mise en œuvre, on cherche à obtenir un remplissage homogène, sans trous de passage ni fissures, ce qui offre une surface dure suffisante dans le cas où la finition est un enduit. Lors de l'installation de la terre allégée, la structure porteuse peut être laissée apparente ou recouverte. Il faut toutefois veiller à ne pas créer de ponts thermiques. Cette technique consiste donc, comme pour le pisé, à utiliser une structure en bois comme coffrage, dans laquelle la terre est répartie en couches puis comprimée. De nombreux additifs sont utilisés dans les mélanges pour terres allégées. Parmi eux, on trouve surtout des fibres végétales longues comme la paille de blé, le seigle, le chanvre, etc. ou des additifs végétaux et/ou minéraux comme la balle de grains, la chènevotte, le roseau, les copeaux de bois, etc. (Confédération de la construction en terre crue, 2020).

Finitions

- Les **enduits** en terre sont utilisés pour le crépissage des murs des bâtiments. Le choix du support, la composition du mélange ainsi que la mise en œuvre et la gestion des détails techniques sont déterminants pour la qualité de l'enduit et peuvent l'altérer fortement. L'enduit d'argile est souvent utilisé pour profiter des propriétés positives de la terre brute (Confédération de la construction en terre crue, 2020).

La préfabrication d'éléments en pisé est une révolution dans la construction en terre. Elle s'accompagne d'un saut quantique quantitatif et qualitatif. La construction traditionnelle et artisanale a ainsi pu être portée à un nouveau niveau. Les possibilités de travailler avec le pisé ont été énormément augmentées par la préfabrication. De plus, la séparation de la production et du montage présente des avantages économiques, principalement liés à la logistique du chantier. Le temps de construction est extrêmement réduit par rapport à la construction traditionnelle en pisé. Les éléments étant déjà secs dans le hall de production, ils peuvent être déplacés rapidement et à temps sur le chantier à l'aide de grues, ce qui permet aux autres corps de métier de suivre sans interruption. Le temps de séchage est toujours le même, mais la préfabrication permet de mieux planifier et répartir la production et le montage (Kapfinger & Sauer, 2017). Ainsi, la production d'éléments préfabriqués est indépendante des conditions météorologiques, les délais peuvent être calculés avec précision et le temps de travail sur le chantier est réduit. Le procédé permet une insertion optimale dans les processus de construction industrialisés. En outre, la préfabrication, qui optimise le travail sur les détails, permet d'atteindre un haut niveau d'individualité malgré les processus industrialisés (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2018).

Le premier élément préfabriqué en pisé posé par l'entreprise Lehm Ton Erde était un mur de salon en 1997. Il devait être réalisé en pisé dans une maison en bois. Cependant, cela n'était pas possible du point de vue de l'organisation. Le calendrier était serré en raison de la construction en bois et la fenêtre de temps prévue pour le mur en pisé se situait en janvier. Il était donc impossible de piler de l'argile, ne serait-ce qu'à cause du gel. Une solution a donc été recherchée, qui consistait à produire le mur dans un hall et à le déplacer en même temps que la construction en bois après le séchage (Kapfinger & Sauer, 2017).

Il a fallu quelques inventions pour rendre la préfabrication possible et augmenter son efficacité, car il s'agit d'un nouveau procédé qui ne peut pas s'appuyer sur des références plus anciennes. Lehm Ton Erde a cherché à réduire la part des travaux physiquement pénibles. Ainsi, une machine a été développée pour remplir les coffrages de matériaux et les compacter une première fois. C'est important, car le remplissage et le compactage sont les activités les plus fatigantes dans la construction en pisé. L'un des avantages de cette machine est que personne ne doit se tenir dans le coffrage pour compacter la terre, ce qui permet de réaliser des murs plus étroits. De plus, la machine permet de réaliser de longs trains de coffrage qui produisent des pans de mur entiers, réalisés en un seul train et avec une stratification continue (Kapfinger & Sauer, 2017). Sur le chantier, les joints entre les différents éléments préfabriqués en argile peuvent être facilement retouchés grâce aux propriétés plastiques du matériau de l'argile, de sorte qu'ils ne sont plus visibles. Ainsi, il est donc possible de fabriquer de grands murs cohérents et d'apparence monolithique, même dans la construction préfabriquée (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2018).

Figure 19 : Usine de production de pisé préfabriqué
© Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde



Figure 17 : Compactage du mélange de pisé introduit dans le coffrage
© Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde

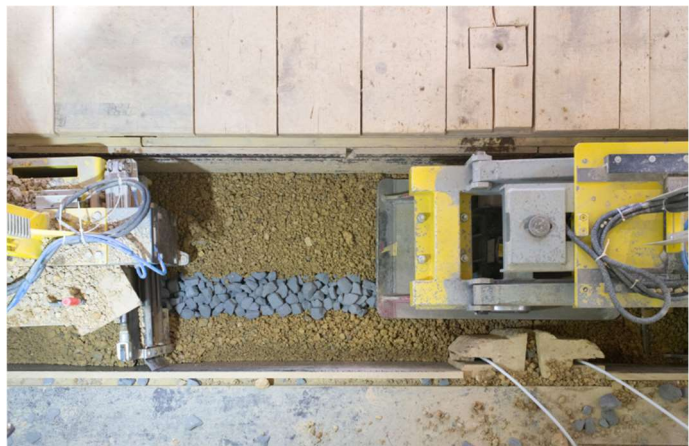


Figure 16 : Machine pour la fabrication des éléments en pisé
© Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde



Figure 18 : Découpe du mur préfabriqué à la longueur de l'élément
© Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde



Comme mentionné précédemment, BC materials travaille principalement avec de la terre, qui est par ailleurs considérée comme un déchet. L'entreprise fabrique différents produits à base de terre crue et tente de les normaliser et de les uniformiser. Pour ce faire, ils préparent par exemple différents mélanges de terre qu'ils appellent « Kastar » et qu'ils proposent dans des Big-Bags prêts à l'emploi. Ces mélanges peuvent être commandés avec différentes couleurs (d'argile) comme on peut le voir ci-dessous et sont utilisés pour le pisé. Ils estiment qu'une tonne de Kastar suffit pour environ 0,4 m³ de mur (BC materials, 2019).



Figure 20 : Différents mélanges de « Kastar » © BC materials

Ils produisent également un mélange prêt à l'emploi d'enduit d'argile, pour lequel on peut choisir aussi parmi les différentes couleurs d'argile (BC materials, 2018).



Figure 21 : Différents mélanges de « Brusseleir » © BC materials

Ce qui rend BC materials particulièrement intéressant, c'est la préproduction de briques de terre crue. Ils les fabriquent en stock dans leur site de production à Bruxelles ou sur le chantier à l'aide de leur unité de production mobile et flexible. La logistique et l'infrastructure restent ainsi à proximité des ressources, ce qui réduit le transport des matériaux à un minimum absolu (BC materials, 2018). Pour un mur de 29,5 cm d'épaisseur, on utilise environ 66 blocs par m², ce qui représente à nouveau environ 515 kg. BC materials livre les blocs d'argile sur des palettes européennes de 128 « brickettes » chacune, soit environ 1.000 kg. Ils proposent différentes variantes de blocs. On peut décider de ne pas les stabiliser, de les stabiliser à la chaux et de choisir entre différentes couleurs et tailles (BC materials, 2022). Avec ces blocs de terre crue, il est même possible de construire des projets à plusieurs étages, en fonction de la stabilisation. Une « brickette » avec stabilisation à la chaux apporte 4-6 MPa, une sans stabilisation 2-4 MPa. Ces blocs peuvent être utilisés comme murs extérieurs si l'on veille à ce qu'ils ne reçoivent pas directement l'eau de pluie. Comme pour tous les produits en terre crue, la règle « bon chapeau - bonnes bottes » s'applique (BC materials, s.d.).



Figure 22 : Unité de production mobile © photo privée



Figure 23 : Préproduction des BTC © BC materials



Figure 24 : Murs construits en BTC © BC materials



Figure 25 : Briques de terre crue préfabriquées © BC materials

Ils travaillent également avec le fabricant de chapes EMB et, pour le modèle commercial avec Natura Mater, sur une chape en terre, le « chape-ter ». Elle applique la technique de la terre déversée. Pour cela, BC materials utilise de la terre excavée à Bruxelles, à laquelle ils ajoutent un dispersant de sel pour limiter la teneur en eau. L'objectif est de développer un nouveau produit matériel durable qui peut en remplacer d'autres. C'est pourquoi le coulage se fait avec des véhicules à béton et des pompes ordinaires, afin que les machines et outils de construction existants puissent continuer à être utilisés. Avant de l'appliquer sur des chantiers pilotes, des prototypes ont été réalisés. Ces prototypes ont été utilisés pour tester différents traitements de surface. Parmi ceux-ci, on trouve par exemple du vinyle laminé, du parquet ou encore des carreaux de céramique (BC materials, 2022).

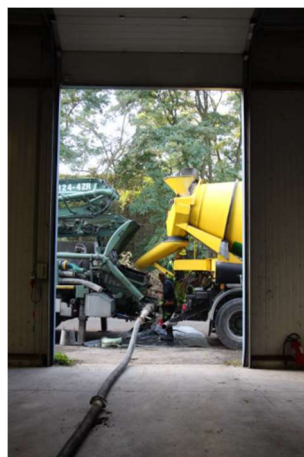


Figure 27 : Véhicule et pompe à béton © BC materials



Figure 26 : Coulée d'une chape en terre crue © BC materials

De même que pour les briques cuites ou le béton, une large gamme de produits de construction a été développée pour les matériaux de construction en terre crue, comme démontré dans les chapitres précédents. Ceux-ci peuvent couvrir un grand nombre d'applications différentes. Toutefois, les produits de construction modernes en terre crue sont encore relativement nouveaux par rapport aux autres matériaux de construction minéraux, ce qui signifie que la gamme de produits est innovante et en constante évolution. Beaucoup se basent pour cela sur l'ordonnance allemande sur la construction en terre crue, qui décrit les principales classes de produits de construction en terre crue actuellement disponibles. En effet, tout comme les autres produits, les matériaux de construction en terre crue doivent répondre aux mêmes exigences générales en matière de protection contre l'incendie, d'isolation acoustique, d'isolation thermique et de stabilité (Schreckenbach, 2004). Cependant, le pisé ne s'achète pas forcément prêt à l'emploi. Les personnes qui souhaitent travailler avec de la terre doivent généralement composer elles-mêmes un mélange de terre. Même s'il existe aujourd'hui des normes à respecter, il n'existe pas de recette précise pour le mélange. C'est pourquoi chaque maison construite en terre est unique et les caractéristiques peuvent également varier d'une maison à l'autre. Le défi pour les ouvriers spécialisés est de trouver la recette appropriée et donc le mélange adéquat pour chaque tâche de construction (Kapfinger & Sauer, 2017).

Les différents pionniers et partisans de la construction en terre, qui représentent une grande partie du développement et des progrès actuels, sont confrontés à des contraintes économiques, techniques et politiques. L'industrie de la construction « mainstream » reste réticente à adopter ce matériau, malgré les nombreux avantages environnementaux et sociaux connus de ce matériau (Ben-Alon L., Loftness, Harries, & Hameen, 2020).

Une étude a été menée sur le degré de familiarité des experts avec les réglementations et directives existantes en matière de construction en terre crue. Le groupe d'experts se compose comme suit : 37% de chercheurs universitaires, 31% d'architectes/designers, 15% de spécialistes de la construction/artisans, 8% de chefs de projet de construction, 5% d'enseignants et 4% d'ingénieurs en structure. Dans le graphique ci-dessous, on peut voir qu'aucune norme ou directive dominante n'a pu être identifiée pour les prescriptions de construction en terre, ce qui permet donc de conclure qu'au sein de la communauté de la construction en terre, les prescriptions de construction ne sont souvent pas appliquées ou sont encore inconnues.

24% des experts ont déclaré n'avoir aucune expérience dans le domaine de la construction en terre. Les experts qui ont déjà une expérience de la construction en terre ont surtout une expérience de l'application des règles de construction conventionnelles pour les projets de construction en terre (27%) (Ben-Alon L., Loftness, Harries, & Hameen, 2020). Il est donc important de diffuser et de faire connaître les nouvelles méthodes modernes afin de faciliter l'adoption et l'application de ces méthodes par les entrepreneurs et de leur montrer qu'elles sont possibles et qu'elles fonctionnent.

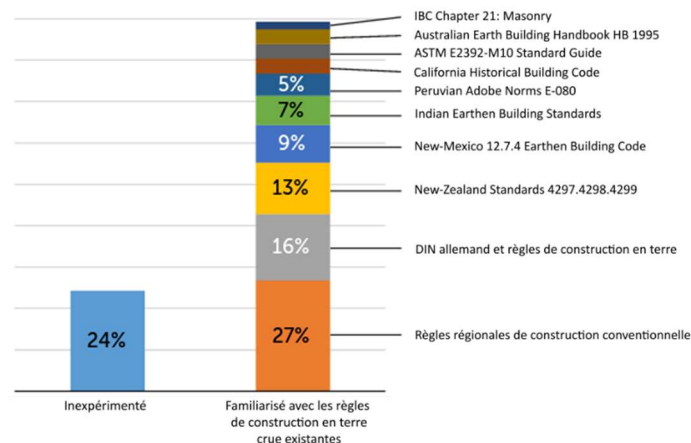


Figure 28 : Normes de construction en terre, traduit de (Ben-Alon L., Loftness, Harries, Hameen, & Bridges, 2020) 29

En principe, les matériaux de construction en argile peuvent être utilisés dans tous les domaines de la construction, qu'il s'agisse du logement, des bâtiments publics tels que les crèches ou les écoles, des bâtiments religieux ou commerciaux, ou encore des bâtiments industriels. Comme nous l'avons vu, l'argile peut être exploitée de multiples façons. Elle peut être utilisée pour les sols, les plafonds, les murs ou les toits. Le terme « construction en terre » est toutefois relatif, car la proportion de matériaux de construction en terre peut varier fortement. Les murs porteurs peuvent, par exemple, être construits en combinaison avec des ossatures en bois ou entièrement en terre crue, comme un mur en pisé. L'argile ne peut cependant pas être utilisée comme fondation (Schreckenbach, 2004).



Figure 29 : École secondaire Païamboué, Koné, Nouvelle-Calédonie (Gauzin-Müller, 2018)



Figure 30 : Centre de méditation, Palo Alto, Californie, USA (Gauzin-Müller, 2018)



Figure 31 : Centre européen d'échantillonnage des sols, Orléans, France (Gauzin-Müller, 2018)

L'histoire de la terre crue

La terre dans le monde

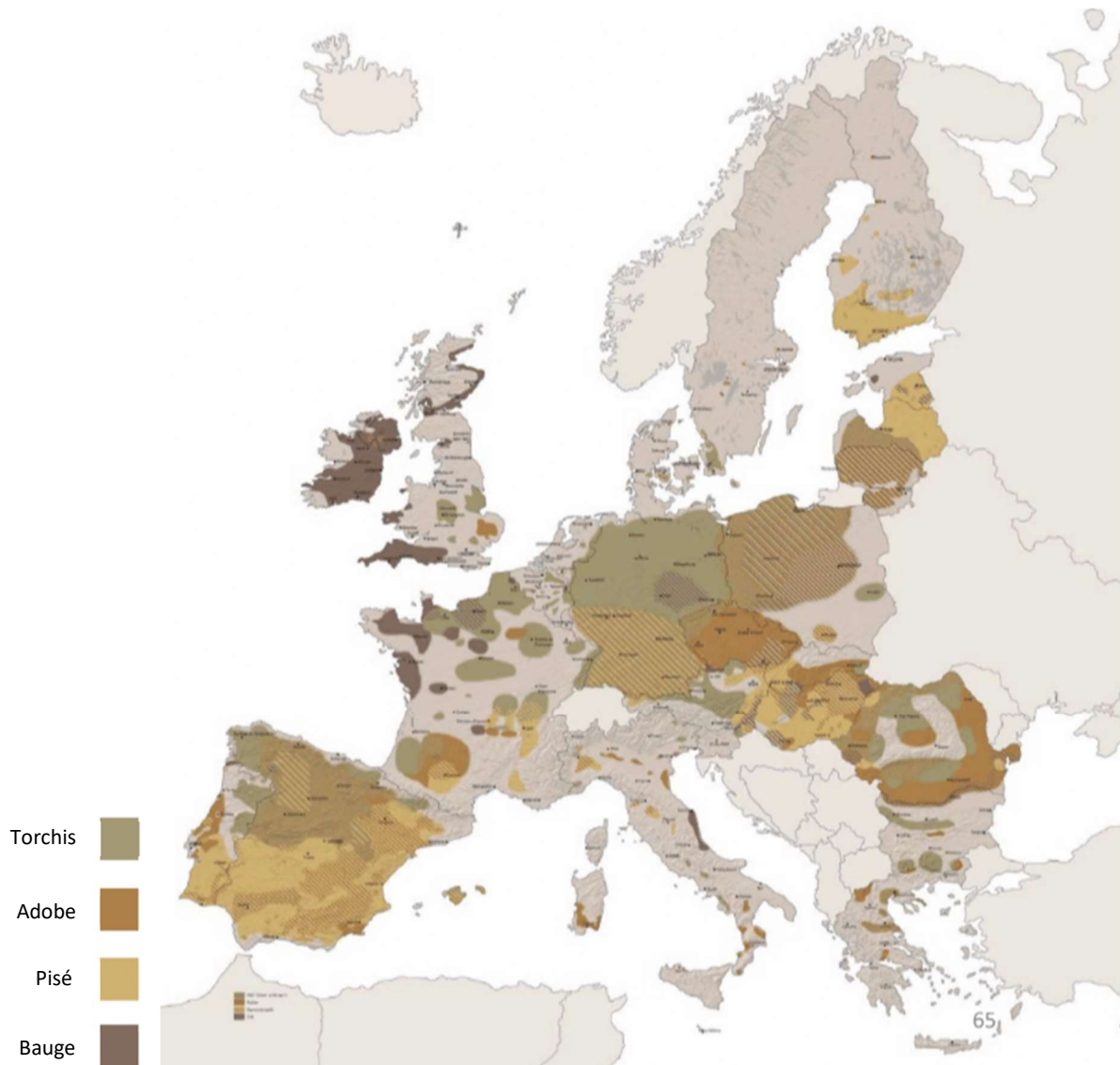


Figure 32 : Architecture historique en terre (Correia, Dipascuale, & Mecca, 2011)

Depuis plus de 11 millénaires, la terre crue est utilisée dans l'architecture vernaculaire comme l'un des principaux matériaux, car il s'agit depuis toujours d'une ressource abondante et facile d'accès. Sa mise en œuvre est simple, elle ne nécessite pas beaucoup d'outils et génère peu de transformations (Anger, 2011).

Il y a 10 000 ans, les premières constructions en terre étaient déjà visibles en Mésopotamie. Pendant l'Empire romain, la construction en terre a été uniformisée en Europe. Par la suite, chaque région a trouvé ses propres méthodes. Actuellement, environ un tiers de la population vit encore dans une maison en terre, car dans les pays du sud, la construction en terre crue est toujours d'actualité (Bronchart, 2013). De plus, il est intéressant de noter que parmi les œuvres architecturales inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO, 20% sont construites en partie ou même entièrement en terre (Anger, 2011). Il s'agit par exemple de grandes parties de la Grande Muraille de Chine, du « Manhattan du désert » - la ville Shibam au Yémen ou la grande Citadelle de Bam en Iran (UNESCO Centre du patrimoine mondial, s.d.).



Figure 33 : Grande Muraille de Chine © Getty Images



Figure 34 : Shibam, Yémen © George Steinmetz



Figure 35 : La grande Citadelle de Bam en Iran © Sacred Sites

En Europe et dans les pays du Nord, on peut voir que ce type de construction a presque complètement régressé depuis la Seconde Guerre mondiale. Cela s'explique par le fait qu'il était important de tout reconstruire rapidement après la guerre, raison pour laquelle d'autres matériaux comme le béton étaient moins chers et donc plus adaptés. De ce fait, les entrepreneurs se sont spécialisés dans les techniques plus modernes et l'artisanat des constructions en terre crue est tombé dans l'oubli. Aujourd'hui, il existe peu, voire pas du tout, de professionnels qui proposent et réalisent des constructions en terre (Bronchart, 2013).

La terre en Belgique

Les bâtiments en terre crue peuvent être trouvés presque partout dans le monde (à l'exception des déserts de glace et de sable). La Belgique ne fait pas exception. Dans notre pays, il est possible de trouver des bâtiments construits à l'aide de ce matériau local et qui sont debout depuis des centaines d'années. Cependant, comme ce matériau est souvent recouvert ou caché, il est oublié par la majorité (Vilquin, 2021).

C'est surtout au Moyen Âge et jusqu'au 19^e siècle que la construction en terre a été très répandue en Belgique. Actuellement, la terre est très peu utilisée en Belgique. Si c'est le cas, elle y est utilisée pour le revêtement des murs et des plafonds en tant qu'enduit. Mais l'industrie du bâtiment ne s'intéresse guère à ce matériau, qui est peu visible dans l'espace public (Bronchart, 2013).

En Belgique, il est encore possible d'observer deux types de bâtiments. D'une part, les bâtiments classés, qui font partie du patrimoine culturel, et d'autre part, les anciens bâtiments agricoles, à savoir les maisons paysannes (Vilquin, 2021).

« La maison espagnole » est un exemple de bâtiment classé. Elle se trouve à Grupont et a été construite vers le 16^e siècle avec des murs en torchis avec enduit à la chaux (Vilquin, 2021). Cette technique de construction à colombage est la plus répandue en Belgique, notamment dans le nord-est et l'ouest du pays, mais des vestiges importants ont été retrouvés dans toutes les régions du pays. Au 14^e siècle déjà, les colombages étaient souvent mentionnés dans la comptabilité des seigneurs. La tradition de cette technique est due à l'importance des sols argileux et à l'abondance des ressources forestières que l'on trouve en Belgique, notamment dans les Ardennes. Au milieu des années 1990, l'utilisation du tressage et de l'argile dans les colombages a été abandonnée et remplacée par des briques cuites. Mais à Liège et dans toute la vallée de la Meuse, des maisons à colombage remplies d'argile ont été réhabilitées après que le crépi plus récent a été enlevé. (Bavay & Bronchart, 2011).



Figure 36 : La maison espagnole © Anaïs Pereira



Figure 37 : Exemple bâtiment agricole © Anaïs Pereira

Cette étable en pisé est un exemple de bâtiment agricole. Elle se trouve à Grange, Braine-le-Comte et a été construite vers le 18^e siècle (Vilquin, 2021).

Les témoins de l'époque interrogés entre 1975 et 1980 sur la construction en terre crue ont parlé de techniques qui n'avaient plus été pratiquées depuis des décennies. Ils se souviennent de l'ajout de bouse de vache à l'argile, mais aussi de chaux, parfois même en petite quantité. La paille était également ajoutée, mais sa quantité était généralement assez faible. La technique consistait à appliquer différentes couches de terre crue sur un socle souvent constitué de blocs de scories. Chaque couche était lissée sur les côtés, soumise à une phase de séchage et servait de support à la couche suivante. Les blocs de terre crue ne sont toutefois pas non plus inconnus en Belgique. Toutefois, à l'époque, ils n'étaient utilisés que pour les murs intérieurs ou parfois pour les voûtes. En outre, on peut trouver en Belgique des maisons en paille qui ont ensuite été recouvertes d'un enduit d'argile. Toutes ces différentes techniques (colombages, mélanges de paille et de terre crue, blocs de terre crue) peuvent se retrouver et coexister dans une même maison. Malheureusement, la documentation sur la construction en terre et en paille en Belgique est plutôt rare dans les archives (Bavay & Bronchart, 2011).

Projets récents en terre crue

BC materials

Présentation BC

BC comprend trois personnes juridiquement enregistrées en Belgique : **BC architects bv** (bureau d'architecture), **BC studies vzw** (laboratoire d'enseignement sans but lucratif), **BC materials cv** (coopérative de production de matériaux) (BC architects & studies, 2023).

Fondée en octobre 2018 par Ken De Cooman, Nicolas Coeckelberghs, Laurens Bekemans et Wes Degreef, cette coopérative de travail s'est donnée pour mission de diffuser les matériaux de construction en terre crue et les connaissances sur le travail de la terre afin de lutter contre la pollution et le gaspillage dans l'industrie du bâtiment. BC est un bureau hybride qui conçoit et réalise des projets visant à un design biorégional, circulaire, low-tech, beau et inclusif (BC materials, 2023).

- **Les BC architects** enseignent à la KULeuven, à l'UHasselt et à la RWTH Aachen pour diffuser leurs connaissances. Ils ont également déjà donné des cours dans d'autres universités en Allemagne et en Suisse (BC architects & studies, 2023).
- **BC studies** est un laboratoire de recherche et d'éducation à but non lucratif qui se manifeste par l'enseignement, la formation, des ateliers, des conseils et la publication de recherches. Il étudie l'environnement matériel en examinant les processus de construction et de production (BC architects & studies, 2023).
- **BC material**, comme indiqué précédemment, tente de trouver des solutions concrètes pour la construction en terre crue.

Avec leur travail, les BC ont déjà remporté plusieurs prix comme le TERRAFIBRA Award : Laureate Educational projects with Women's house in Ouled Merzoug, Morocco en 2021. Le dernier prix en date est le Belgian Construction Award - Climate Future Product, décerné en 2022 (BC materials, 2023).

Projets de BC materials

En 2015, BC architects & studies a remporté un concours organisé par la commune d'Edegheem. La tâche consistait à construire pour la maison régionale un entrepôt dans lequel les enfants pourraient apprendre des leçons sur la nature et l'écologie. La proposition de BC architects & studies est une maçonnerie de blocs de terre compressée en terre crue locale ainsi qu'une façade et un toit isolants en béton de chanvre. La maison régionale reflète donc cette approche pédagogique et écologique par cette architecture participative et radicalement durable, qui la rend en outre négative en termes de CO₂.

Pour la construction, 19.000 blocs de terre locale compressée ont été fabriqués au cours d'un atelier de trois semaines. Ceux-ci, utilisés pour les murs et les arcs porteurs, présentent une résistance à la compression de 4,2 MPa. Ensuite, environ 312 m² de béton de chanvre ont été posés en deux semaines.

Ce projet a surtout servi à un énorme transfert de connaissances par sa pratique, car plus de 150 volontaires au total ont travaillé sur ce projet (BC materials, 2015).



Figure 38 : Photos du projet à Edegheem © BC materials

LUMA Arles, un complexe culturel français, a conçu dans le cadre du programme Atelier LUMA un projet « Lot 8 ». C'est une étude à long terme sur l'architecture biorégionale, qui tente de s'orienter vers les principes de durabilité et de localité. L'ancien bâtiment a servi de complexe industriel au 19e siècle pour la construction et la réparation de locomotives. Le Magasin Electrique occupe une partie du bâtiment industriel d'origine. Dès 2016, LUMA a entamé les travaux préparatoires à la restauration en collaboration avec BC architects & studies et l'Assemble. Pour ce faire, ils essaient de trouver des solutions innovantes qui ont un impact négatif minimal sur l'environnement. Cet engagement à utiliser des ressources durables et locales se retrouve dans chaque aspect de la restauration, du crépi des façades aux décorations des sorties (Breschi, 2023).

Le nouveau Magasin Electrique sert aujourd'hui de lieu de travail à l'équipe de LUMA. Il comprend des ateliers pour le bois, la céramique et le textile, des bureaux, un laboratoire biologique, un laboratoire de test des matériaux, un atelier de teinture ainsi qu'un jardin de plantes fonctionnel avec un système d'irrigation souterrain et un système expérimental de traitement de l'eau. En outre, des expositions temporaires et des événements publics sont organisés dans l'agora centrale (Breschi, 2023).

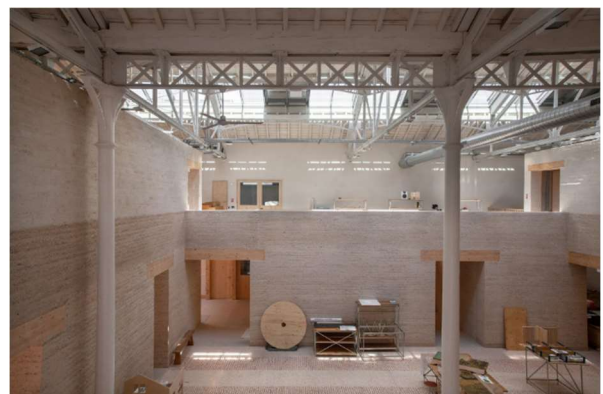


Figure 39 : Le projet « Lot 8 » (Breschi, 2023)

Les architectes de hé! architectuur ont déjà réalisé plusieurs projets avec l'équipe de BC. Comme ce mur en pisé dans l'un de leurs projets (hé! architectuur, 2022). Dans un autre, ils ont conçu un élément de cuisine en pisé et les murs ont été réalisés avec un enduit d'argile (hé! architectuur, 2022).



Figure 40 : Mur en pisé (hé! architectuur, 2022)



Figure 41 : Élément de cuisine / enduit d' argile (hé! architectuur, 2022)

Martin Rauch – Lehm Ton Erde

Présentation Martin Rauch

Martin Rauch est né en 1958 à Schlins en Autriche. Il a suivi une formation de céramiste, de constructeur de poêles et de sculpteur. Pendant sa formation, il a travaillé de nombreux mois comme coopérant en Afrique, où il a fait la rencontre de modes de construction et de vie « primitifs », qui consistent en des cycles simples et utilisent les ressources de manière optimale, comme la construction en terre crue. Sur place, il a également observé comment ces savoir-faire étaient brutalement supplantés par des technologies des pays industrialisés extrêmement coûteuses, bien moins performantes sur le plan écologique, difficilement réparables et non recyclables (Kapfinger & Sauer, 2017). C'est ainsi qu'à son retour Rauch a rédigé son mémoire de fin d'études à l'École supérieure des arts appliqués de Vienne sur les nouvelles possibilités de conception dans la construction en terre (Kapfinger & Sauer, 2017).

Selon le « pape de l'argile », ce matériau de construction, qui a fait ses preuves depuis longtemps, permet de construire des bâtiments non seulement contemporains, mais aussi tournés vers l'avenir (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2018). Dès le début, il s'est particulièrement intéressé à la technique du pisé. Rauch avait pour objectif de rendre l'argile à nouveau visible et d'exploiter toutes les facettes du matériau « terre ». Petit à petit, il a testé et amélioré les mélanges de matériaux, les techniques de compactage, les formes de coffrage et a développé les anciennes techniques en ajoutant des couches d'armature supplémentaires. Grâce à ces développements, il est devenu le précurseur de la préproduction d'éléments en pisé finis, ce qui a révolutionné la construction en terre crue (Kapfinger & Sauer, 2017).

En 2005, Rauch a commencé à construire sa propre maison (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2008), qu'il a entièrement construite en argile et qu'il décrit lui-même par la suite comme une hutte africaine traditionnelle en argile, construite selon les normes européennes modernes (Christofori, 2020).

Entre-temps, il existe de nombreux projets que Martin Rauch a construits en collaboration avec différents bureaux d'architectes. Par exemple, avec les architectes de Herzog & de Meuron, le centre

d'herbes Ricola en Suisse (2012-2013) ou, avec le bureau Boltshauser Architekten, le pavillon scolaire Allenmoos II à Zurich (Suisse, 2011-2012) (Kapfinger & Sauer, 2017).

Depuis 2010, Rauch est professeur honoraire de la chaire de l'UNESCO « Earthen Architecture » et depuis 2014, il enseigne avec Anna Heringer en tant que professeur délégué à l'ETH de Zurich (Kapfinger & Sauer, 2017).

En 2016, le jury du TERRA Award a décerné à Martin Rauch un prix spécial pour l'ensemble de son œuvre. Pionnier du pisé, il révolutionne depuis plus de 25 ans un savoir-faire millénaire grâce à des innovations technologiques et esthétiques. Son concept industriel ouvre de nouvelles perspectives à la mise en œuvre du pisé, qui se passe totalement de ciment pour que le matériau puisse toujours être restitué au sol à la fin de son cycle de vie. En 2016, quatre de ses bâtiments construits à l'aide de ses modules préfabriqués en terre battue ont été finalistes du TERRA Award. Il s'agit du centre des visiteurs de la station ornithologique de Sempach, du centre des herbes Ricola à Laufen, de la maison de vacances Piazza Pintgia en Suisse, ainsi que des bureaux de l'imprimerie Gugler à Pielach en Autriche (Gauzin-Müller, 2018).

Projets de Martin Rauch

Centre des visiteurs de la station ornithologique, Sempach, Suisse :

La station ornithologique a été conçue par les architectes :mlzd et réalisée avec l'entreprise Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, sous la direction de Martin Rauch. Il s'agit d'un complexe de bâtiments en trois parties, composé de deux corps de bâtiments compacts en terre crue reliés par une entrée vitrée (Gauzin-Müller, 2018). Devant la structure en béton armé se trouvent les éléments de façade préfabriqués en pisé, qui sont autoportants. Les cadres de fenêtres en acier corten, ancrés comme les fenêtres au pisé, ont également été posés avec ces éléments de façade (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2014). Environ 1000 tonnes de terre crue du Laufental ont été utilisées pour les éléments de la façade (BauNetz, 2015) qui s'étend sur une surface de 1240 m². Les différents éléments ont une épaisseur comprise entre 35 et 45 cm (Gauzin-Müller, 2018).



Figure 42 : Centre des visiteurs de la station ornithologique, Sempach, Suisse (Gauzin-Müller, 2018)



Figure 43 : Pose des éléments préfabriqués (Gauzin-Müller, 2018)

Le centre d'accueil est considéré comme un projet pionnier en matière d'écologie de la construction, car il s'agit du premier bâtiment en Suisse construit sur trois étages en terre crue. En outre, il répond au standard Minergie-P-Eco, un label écologique qui est l'un des plus exigeants d'Europe (BauNetz, 2015). Pour répondre à ce label, les piliers en béton armé de l'enveloppe extérieure ont été enveloppés dans une épaisse couche d'isolation en cellulose. La structure porteuse du toit ainsi que les menuiseries intérieures ont été réalisées en bois de mélèze, qui s'harmonise bien avec les murs en terre (Gauzin-Müller, 2018).



Figure 44 : L'intérieur du centre des visiteurs (Gauzin-Müller, 2018)

Centre d'herbes Ricola, Laufen, Suisse :

L'entrepôt pour les herbes des bonbons Ricola est le plus grand bâtiment en pisé d'Europe. Il a été conçu avec le cabinet d'architectes Herzog & de Meuron et réalisé par l'entreprise de Martin Rauch, Lehm Ton Erde Baukunst GmbH. L'entrepôt mesure 111 m de long, 29 m de large et 11 m de haut. Les matériaux utilisés proviennent des sites environnants. Martin Rauch a construit une installation de production à proximité du chantier afin de pouvoir préfabriquer la façade autoportante de 3000 m². Pour la production, les différentes couches d'argile ont été tassées dans un coffrage de 45 cm de large. Ce mode de fabrication industriel novateur a ouvert de nouvelles perspectives pour le pisé (Gauzin-Müller, 2018). Cette innovation a permis de déplacer les 666 blocs de pisé en seulement 5 mois. Les murs autoportants sont accrochés à la structure en béton du hangar et offrent un taux d'humidité de 50%, essentiel pour les herbes aromatiques, presque sans apport d'énergie (Mack, 2014).



Figure 45 : Centre d'herbes Ricola, Laufen, Suisse (Gauzin-Müller, 2018)

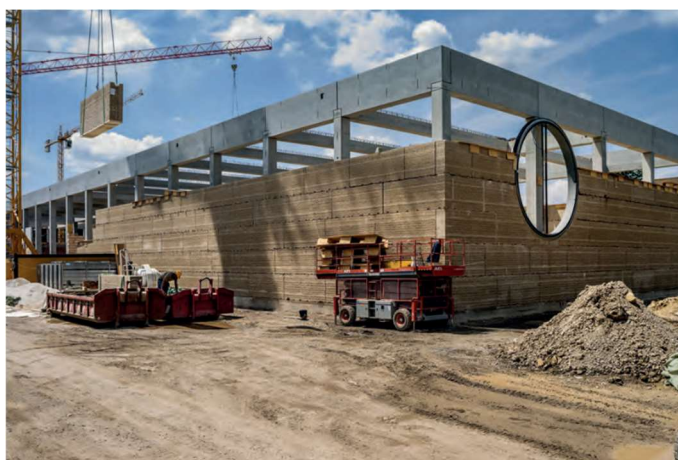


Figure 46 : Pose des éléments préfabriqués (Gauzin-Müller, 2018)



Figure 48 : Séchage des éléments préfabriqués dans le hall de production (Gauzin-Müller, 2018)



Figure 47 : Retouche des joints entre les éléments préfabriqués (Gauzin-Müller, 2018)

Maison de vacances Piazza Pintgia, Almens, Suisse :

Située au cœur d'un petit village alpin, l'étable d'origine, conçue par les architectes gujan + pally architekten, a été transformée en une belle maison de vacances en collaboration avec l'entreprise Lehm Ton Erde Baukunst. Dans ce cas, le pisé est porteur et l'espace de vie lumineux se construit autour du poêle à bois construit en pisé et autour des murs porteurs en pisé qui s'élèvent sur trois étages. Les modules préfabriqués ont été soulevés vers l'intérieur par une ouverture dans le toit (Gauzin-Müller, 2018). D'une part, les murs en pisé de 50 cm d'épaisseur donnent au bâtiment une masse de stockage qui sert de parois de chauffage ou de refroidissement, et d'autre part, ils



Figure 49 : Maison de vacances Piazza Pintgia, Almens, Suisse (Gauzin-Müller, 2018)

régulent l'humidité à l'intérieur de la maison de vacances (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2010).



Figure 50 : L'intérieur de la maison de vacances Piazza Pintgia (Gauzin-Müller, 2018)



Figure 51 : Posé d'un élément préfabriqué (Gauzin-Müller, 2018)

Bureaux de l'imprimerie Gugler, Pielach Autriche :

Le premier grand projet de l'entreprise Lehm Ton Erde a été l'immeuble de bureaux de l'imprimerie Gugler à Pielach (Kapfinger & Sauer, 2017). Les architectes du bureau sont Herbert Ablinger, Vedral & Partner (Gauzin-Müller, 2018). Pour la construction, 160 éléments en pisé ont été préfabriqués pendant trois mois. En revanche, le temps de montage des éléments n'a été que de deux semaines (Kapfinger & Sauer, 2017). Les murs en pisé sont porteurs, mais ils sont complétés par une structure porteuse en bois lamellé-collé d'épicéa (ossature en bois). L'imprimerie Gugler est une pionnière en matière d'utilisation d'encre et de papier écologiques, c'est pourquoi ses espaces de travail et de production ont également été conçus selon des critères de durabilité (Gauzin-Müller, 2018).

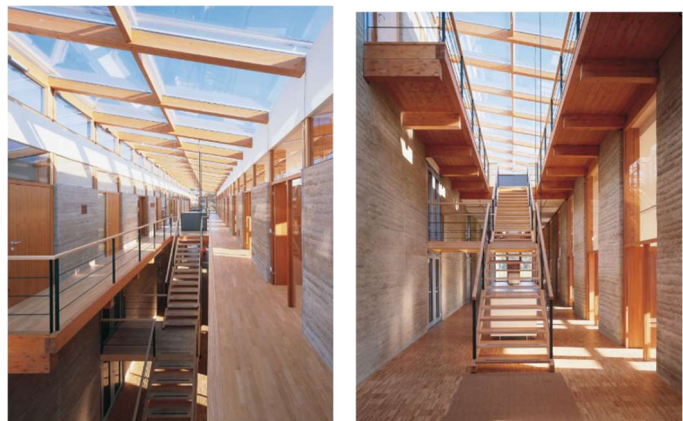


Figure 52 : L'intérieur des bureaux de l'imprimerie Gugler, Pielach, Autriche (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2000)

Autres projets précurseurs

Un projet finaliste du TERRAFIBRA Award 2021 est un exemple de construction avec des blocs de terre crue. Il s'agit d'un bâtiment servant de pôle culturel à Cornebarrieu en France. Construit en terre et en bois, ce bâtiment atteint la classe d'efficacité énergétique d'une maison passive et abrite les deux programmes complémentaires d'une salle des fêtes et d'une médiathèque ((APM) Architecture & Associé, 2017).



Figure 53 : Pôle culturel à Cornebarrieu, France ((APM) Architecture & Associé, 2017)

Un autre projet réalisé avec des briques de terre crue BTC et récompensé par le TERRAFIBRA Award 2021 est la restauration et la transformation partielle du Grand Théâtre de Genève, en Suisse. Il a été conçu par l'atelier d'architecture March et B+S ingénieurs et réalisé par les entreprises ALPHA et TERRABLOC (Terrafibra, 2021).



Figure 54 : Restauration et transformation partielle du Grand Théâtre de Genève, Suisse (TERRAFIBRA, 2021)

En France, on peut trouver un autre projet intéressant. Près de la frontière allemande, à Dehlingen, un musée d'archéologie a été conçu par le bureau nunc architectes et construit par l'entreprise Caracol en utilisant deux techniques de construction en terre. Les deux nouvelles cloisons du bâtiment existant datant du 17^e siècle ont été construites en terre crue traditionnelle. La nouvelle extension entièrement en pisé. Le mur intérieur a été pilonné sur place et séparé par une couche de liège du mur extérieur, qui a été construit à partir d'éléments de façade préfabriqués. Une particularité est qu'une paroi vitrée, placée devant le pignon sud, fonctionne comme un système de chauffage solaire passif. Le soleil réchauffe l'air entre la couche de verre et le mur en terre crue et, grâce à la capacité de stockage thermique et à l'inertie de la terre crue, les salles du musée sont ainsi tempérées. Ce bâtiment a reçu le prix national d'architecture contemporaine en terre crue en 2013 (Gauzin-Müller, 2018 ; nunc architectes, 2014).



Figure 55 : Musée d'archéologie, Dehlingen, France (nunc architectes, 2014)

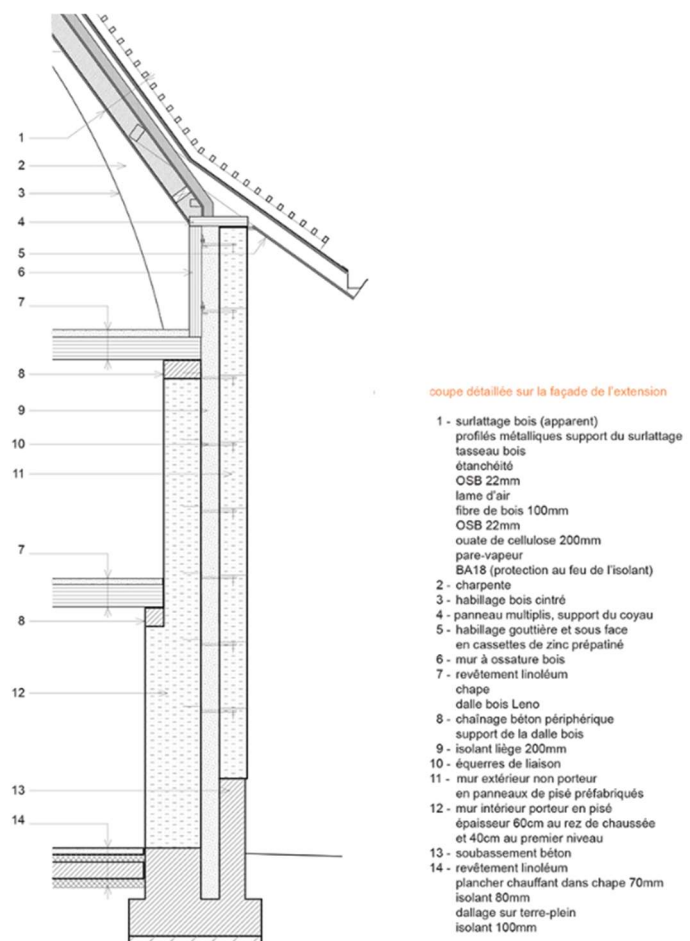


Figure 56 : Détail technique de construction (nunc architectes, 2014)

Présentation de CRAterre

Une brève présentation de l'organisation CRAterre est indispensable pour parler de la terre crue. CRAterre est une organisation et un centre de recherche au sein de l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble qui s'occupe de la construction en terre, de ses techniques, de sa conservation et de sa diffusion. Fondée en 1979, elle est considérée comme le principal centre de recherche international sur la construction en terre. Elle soutient la conservation du patrimoine culturel en terre crue ainsi que la compréhension et le développement des cultures en terre crue d'un point de vue environnemental, social et culturel (CRAterre, s.d.).

Projets de CRAterre

CRAterre a différents projets à travers le monde, qui visent principalement à préserver et à promouvoir la construction en terre et ses techniques. Dans leur dernière newsletter de mai 2023, ils citent entre autres les projets en cours suivants :

- Autour des agglomérations de Grenoble-Lyon-Valence, ils observent l'évolution de la « filière terre » et finalisent actuellement un inventaire qui regroupe les opérations de construction de nouveaux éléments en terre crue. Un focus sur les 10 dernières années doit permettre de dégager les tendances récentes et donc de proposer des hypothèses d'évolution. Mais l'objectif global est d'observer l'évolution de la métropole sur 50 ans et de dresser un profil du marché. Le tout est basé sur une étude réalisée en 2015 par Anne-Lyse Antoine et Elisabetta Carnevale. Pour être répertorié, un projet doit comporter au moins un élément neuf construit en terre crue entre 1972 et 2022. Toutes les techniques sont valables, à l'exception du crépi en argile, et les travaux doivent avoir été réalisés par un entrepreneur et pas être des projets de rénovation ou d'autoconstruction. Fin avril, l'inventaire comportait environ 500 références (CRAterre, 2023).

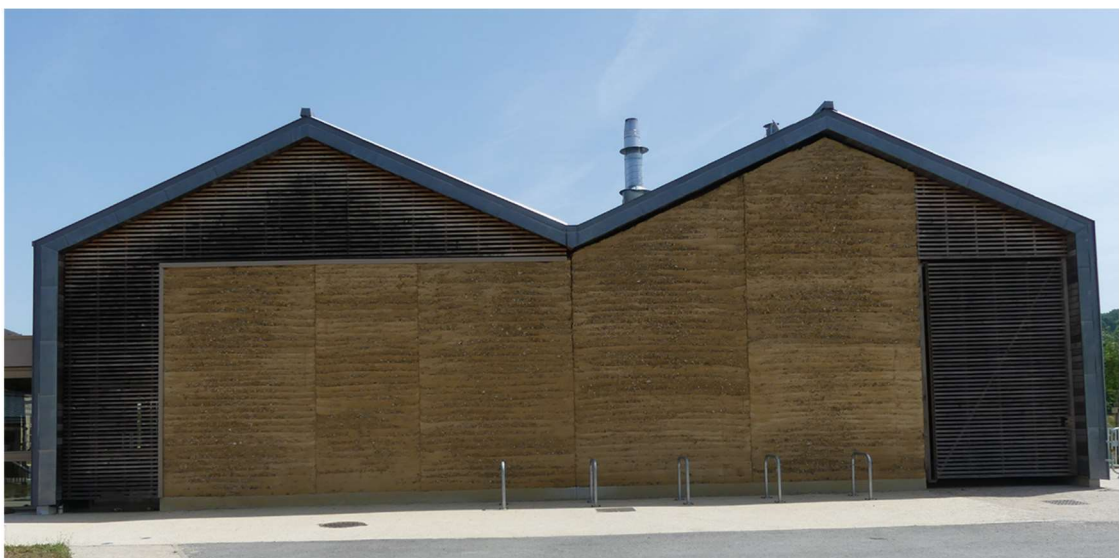


Figure 57 : Un des projets avec un nouvel élément en terre crue (CRAterre, 2023)

- CRAterre aide également à la préservation des sites du patrimoine mondial. Après que le site du patrimoine mondial de Mohenjo-Daro au Pakistan avait été gravement endommagé par

des pluies torrentielles en août 2022, un expert de CRAterre a été mandaté par l'UNESCO pour effectuer deux missions d'urgence dans le cadre du programme d'aide d'urgence de la Convention mondiale. La première mission a permis de faire un état des lieux des dégâts, de réfléchir à la nature de la réponse à apporter et de mettre en place un programme d'urgence. La seconde mission a consisté en un atelier alternant séances théoriques et pratiques. Un programme détaillé a ainsi été élaboré, qui sera mis en œuvre avant la prochaine mousson, ce qui permettra d'adapter le travail pratique de conservation à Mohenjo-Daro aux effets potentiellement récurrents du changement climatique (CRAterre, 2023).



Figure 58 : Site du patrimoine mondial, Mohenjo-Daro, Pakistan (CRAterre, 2023)

La terre en Wallonie

En Belgique, quelque 37 millions de tonnes de terre sont excavées chaque année. La plupart du temps, cette terre est ensuite emportée pour être déposée temporairement dans un lieu de stockage. Plus tard, une partie de la terre est rechargée pour des travaux de remblayage et transportée vers le lieu correspondant (Van der Linden, 2021). 75% sont non polluées, dont 40% sont utilisées dans un système à usage unique pour la construction de routes et environ 60% sont remblayées en tant que déblais dans des fosses et des décharges (De Cooman, 2020). Cela entraîne la perte de ressources qui peuvent être précieuses pour des utilisations techniques et économiques de qualité (Klinge, Roswag-Klinge, Radéjic, Bojic, & Neumann, 2020).

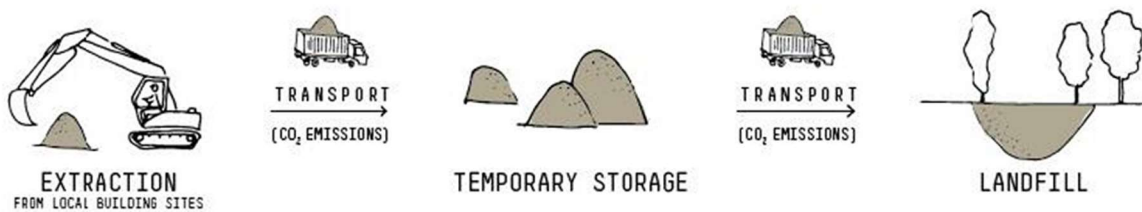


Figure 59 : Gestion des terres © BC materials

Selon les recherches de BC materials, environ 16 millions de tonnes pourraient être réutilisées en Belgique pour la construction en terre crue. En partie pour la réutiliser directement sur le chantier, en partie pour transformer la terre stockée et créer ainsi un stock de matériaux en terre crue comme des blocs de terre crue (Van der Linden, 2021).

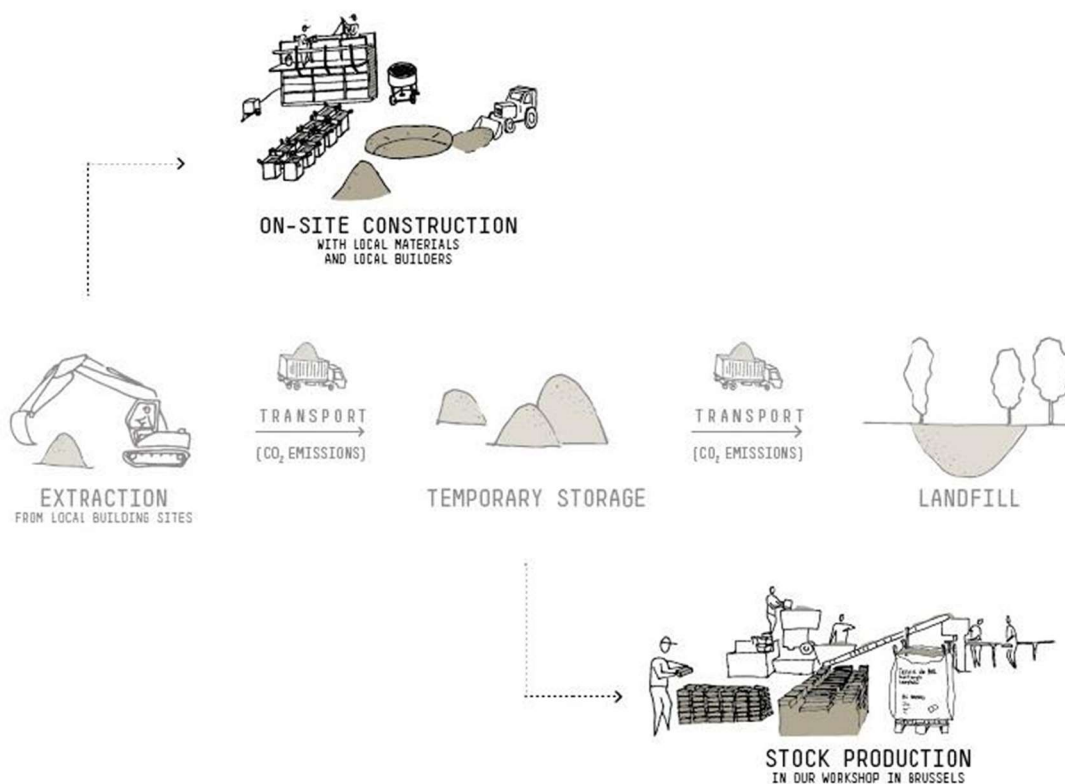


Figure 60 : Utilisation possible des déblais © BC materials

Analyse et évaluation des types de terres

Composition des sols

Les sols sont composés de matières minérales et organiques, d'air, d'eau et d'organismes vivants. Grâce à des processus physiques, chimiques et biologiques, ils se transforment lentement en différentes structures telles que des pores, des agrégats et des horizons. Ces structures varient en fonction du matériau parental, du relief, du climat, de la végétation et de l'âge du sol. Elles déterminent également le type de sol et ses propriétés, qui sont influencées par les activités humaines telles que l'agriculture et l'imperméabilisation (Etat de l'environnement wallon, 2018).

L'un des premiers pays à avoir établi une carte détaillée des sols à grande échelle a été la Belgique. La texture, le drainage naturel, la présence de certaines couches de sol et le type de fragments de roche constituent la base de cette carte. Dans le cadre du projet de cartographie numérique des sols de Wallonie (PCNSW), la région wallonne de cette carte a été numérisée. L'objectif de ce projet est de créer une base de données géographique régulièrement mise à jour sur les sols wallons (Etat de l'environnement wallon, 2018).

L'étendue temporelle de la carte est de 1947-1991 et elle a été établie en 2005 (Service public de Wallonie, 2022).

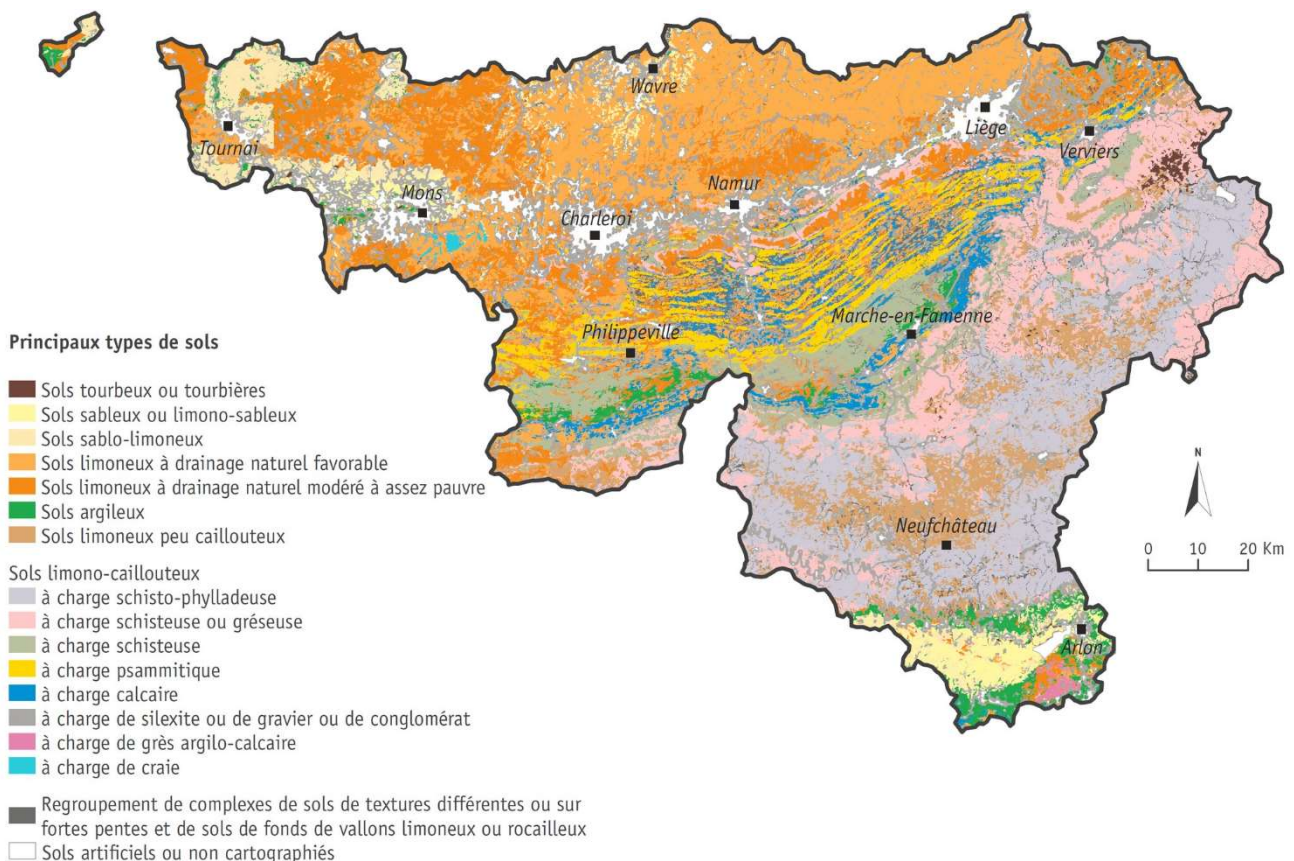


Figure 61 : Principaux types de sols © SPW - 2018

La carte montre clairement que la Wallonie dispose de sols variés :

- Au nord du sillon Sambre-et-Meuse, on trouve des sols limoneux et sablo-limoneux fertiles.
- Dans des régions comme le Condroz, la Famenne et la Calestienne, on trouve des sols limono-caillouteux, acides ou calcaires.
- Dans les Ardennes, on trouve des sols limoneux acides peu graveleux à modérément graveleux.
- Dans les Hautes Fagnes, on trouve des sols tourbeux.
- En Lorraine belge, les sols sont variés, y compris des sols argileux et limono-sableux aux propriétés différentes (Etat de l'environnement wallon, 2018).

Comme nous examinons dans l'analyse qui suit le potentiel de transformation de la terre excavée en Wallonie pour la méthode de construction du pisé, la question se pose de savoir si la terre en Wallonie est adaptée à ce type de construction.

La matière première « terre » est très variée et comme nous l'avons vu dans le chapitre sur les méthodes, il existe de nombreux types de terres qui peuvent être utilisés pour la fabrication d'éléments en pisé. Par exemple, la terre peut être très argileuse ou contenir peu d'argile, avoir beaucoup de grands éléments ou peu de grands éléments, etc. Le mélange de terre doit toujours être adapté au sol existant (Confédération de la construction en terre crue, 2020). Néanmoins, selon les données de CRAterre, la meilleure terre pour le pisé doit être composée de 0 à 15 % de gravier, 40 à 50 % de sable, 35 à 20 % de limon et 15 à 25 % d'argile (CRAterre, et al., 1979).

Ainsi, le sud-est de la Wallonie, avec ses terres phyllades, quartzites, schistes et grès, serait plutôt moins approprié. Les autres parties de la Wallonie seraient mieux adaptées à la production de matériaux de construction en argile et surtout en pisé, car elles présentent beaucoup de sols sableux ou limoneux.

L'état des sols

Outre les caractéristiques de la terre, il est également important de vérifier avant d'utiliser la terre excavée si elle n'est pas éventuellement polluée.

Le décret spécifiquement dédié à la gestion des sols, entré en vigueur le 1er janvier 2019, a introduit un certain nombre de mesures. Parmi elles, la banque de données sur l'état des sols (BDES). Cette dernière a pour but de donner accès à tous les citoyens aux données relatives à l'état des sols en Wallonie dont dispose l'administration. Cela signifie que la base de données indique, pour chaque parcelle, si le sol est pollué ou doit encore être analysé. Elle permet en outre de délivrer des extraits conformes lors de certaines démarches administratives. Les données disponibles sur les éventuelles pollutions historiques ou actuelles des sols sont enregistrées par la base de données pour chaque parcelle cadastrale ainsi que les parcelles sur lesquelles sont exercées des activités présentant un risque potentiel pour le sol (Direction de la Protection des Sols du Service public de Wallonie, s.d.).

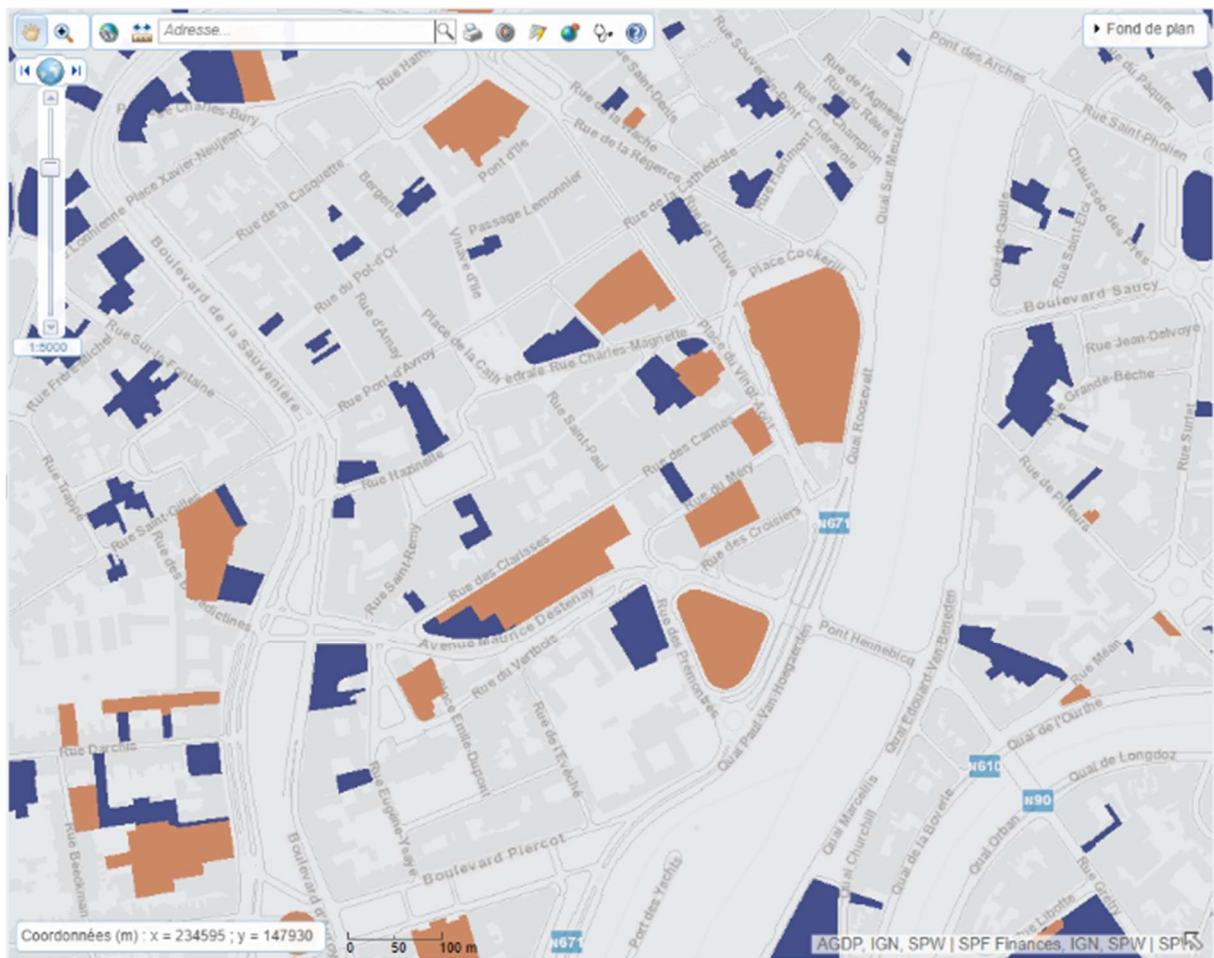


Figure 62 : Exemple de la carte du BDES, Liège centre-ville © BDES

Les deux couleurs différentes indiquent les parcelles qui font l'objet d'une attention particulière.

- **La couleur bleu lavande** informe les citoyens ou les entreprises du risque de pollution des sols. Toutefois, cette information n'est pas suffisante pour justifier une obligation d'enquête ou d'assainissement. Cette couleur correspond à moins d'un pourcentage des terrains en Wallonie et les informations dont dispose **l'administration ne sont qu'indicatives**.
- **La couleur pêche démontre que le terrain a déjà fait l'objet de mesures de gestion du sol** ou qu'il reste à en faire. La couleur indique donc que le terrain doit faire l'objet d'une attention particulière.

Cependant, 95 % des terrains en Wallonie ne sont pas concernés par les données de la BDES. Ils n'ont pas de couleur spécifique, car l'administration ne dispose pas, au moment de la consultation, de données permettant de déterminer si le terrain est pollué ou potentiellement pollué. L'absence de couleur ne garantit cependant pas l'absence de pollution, mais n'entraîne aucune obligation d'investigation ou de dépollution (Direction de la Protection des Sols du Service public de Wallonie, s.d.).

Réutilisation des déblais localement sur le site de construction

Afin de déterminer le potentiel de la terre excavée pour la production locale de pisé sur le site de construction, ce travail se concentre sur des calculs hypothétiques. Dans le chapitre précédent, il a été constaté que la terre en Wallonie serait en grande partie relativement bien adaptée à la production de pisé. Dans la réalité, les différentes caractéristiques de la terre joueraient néanmoins un rôle important. Dans la pratique, il faudrait peut-être exclure certains sites si la terre n'y présentait pas les caractéristiques nécessaires à la production de pisé. Ce travail a pour but de donner un premier aperçu du potentiel général des déblais de terre pour la production locale sur chantier. **Il est important de souligner qu'il s'agit de calculs hypothétiques et simplifiés et qu'il existe d'autres facteurs à prendre en compte dans la pratique.** Les études visent à obtenir une première estimation du potentiel général et à évaluer si la quantité de terre excavée disponible pouvait être suffisante pour une production de pisé directement sur les chantiers, et donc à déterminer s'il pourrait être intéressant de poursuivre les recherches dans ce domaine, de former des professionnels et d'essayer de réduire les coûts de la construction en terre crue.

Pour simplifier et limiter l'analyse, nous nous limitons au pisé pour les calculs, même s'il existe de nombreuses autres méthodes. Pour cela, nous utilisons les données quantitatives fournies par BC materials. Ils indiquent qu'une tonne de mélange de terre permet de produire 0,4 m³ de pisé (BC materials, 2019). Pour les calculs, nous supposons que toute la terre excavée est adaptée à la production et présente les caractéristiques requises.

En vue de limiter encore plus les calculs et de pouvoir mieux comparer leurs valeurs, nous ne calculons que l'excavation pour une maison unifamiliale. La maison moyenne en Belgique a une superficie totale de 125 m² (Verpoorten, 2023). Si nous supposons que celle-ci est répartie de manière égale sur deux étages, cela donne une surface au sol de 62,5 m². Cependant, l'excavation déplace souvent plus de terre que ce qui est réellement nécessaire pour la surface habitable. Pour en tenir compte et simplifier le calcul, nous prenons dans les calculs une surface excavée de 70 m².

Les différentes couches de sol (horizons) doivent être prises en compte afin de déterminer la quantité de terre excavée qui peut être utilisée pour la fabrication du pisé. Les 20 à 30 premiers centimètres sont déduits, car il s'agit de terre végétale qui ne peut pas être transformée en matériau de construction.

De plus, pour les calculs, on part du principe que 1 m³ de terre pèse plus ou moins 1 tonne (sanier.de, 2022).

Le potentiel est illustré par un croquis schématique qui permet de mieux comparer les différents scénarios. Il s'agit d'un bâtiment de 10 m x 6 m, d'une hauteur à la gouttière de 7 m et d'une hauteur au faite de 9 m, dont les murs de façade ont une largeur de 40 cm. Dans ce schéma, nous supposons que les murs ont une largeur de 40 cm et que la surface totale de la façade est de 236 m².

Premier cas : Maison sans cave

- Surface de la fouille : 70 m²
- Profondeur de la fondation creusée : 80 cm (pour atteindre la limite hors gel)
- Terre végétale non adaptée à la transformation : 30 cm

1. Calcul du volume de sol excavé :
Surface au sol x (profondeur des fondations - couche de terre végétale non appropriée)
 $70 \text{ m}^2 \times (80 \text{ cm} - 30 \text{ cm}) = 35 \text{ m}^3$
2. Calcul du poids de la terre excavée

Volume des déblais x poids par m³ de terre excavée = poids des déblais

35 m³ x 1 tonne/m³ = 35 tonnes

3. Calcul du mur potentiel en pisé :

Volume d'une tonne de terre excavée en pisé : 0,4 m³ (BC materials, 2019)

Volume du mur potentiel en pisé = poids de la terre excavée x volume d'une tonne de terre excavée en pisé

35 tonnes x 0,4 m³/tonne = 14 m³

4. Calcul de la surface du mur :

Épaisseur supposée du mur : 40 cm (0,4 m)

Volume du mur potentiel en pisé / épaisseur du mur = surface du mur

14 m³ / 0,4 m = 35 m²

Avec 35 tonnes de terre excavée, on pourrait donc construire un mur en pisé de 14 m³. Avec une largeur de mur de 40 cm, cela correspond à une surface de 35 m². Pour mieux illustrer ces dimensions, cette surface pourrait être un mur de 3,5 m de haut et de 10 m de long.

Dans notre exemple, on voit que cela ne permettrait pas de couvrir une grande partie de la maison.

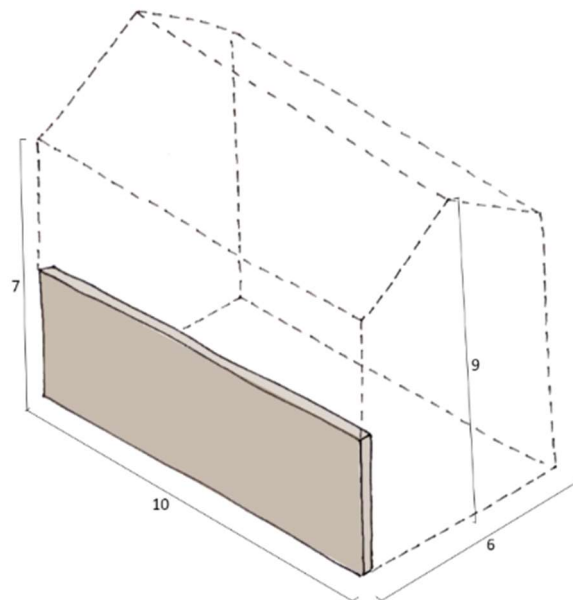


Figure 63 : Premier cas, maison sans cave © illustration personnelle

Deuxième cas : Maison avec cave

Pour ce calcul, nous partons du principe que la maison sera construite sur un terrain plat et qu'elle aura un sous-sol complet.

- Surface de la fouille : 70 m²
- Profondeur de la cave creusée : 2,5 m
- Profondeur de la dalle : 50 cm
- Terre végétale impropre à la transformation : 30 cm

1. Calcul du volume de terre excavée :

Surface au sol x (profondeur des fondations - couche de terre végétale non adaptée)

70 m² x (250 cm + 50 cm - 30 cm) = 70 m² x 270 cm = 189 m³

2. Calcul du poids de la terre excavée :

Volume des déblais x poids par m³ de terre excavée = poids des déblais
189 m³ x 1 tonne/m³ = 189 tonnes

3. Calcul du mur potentiel en pisé :

Volume d'une tonne de terre excavée en pisé : 0,4 m³ (BC materials, 2019)

Volume du mur potentiel en pisé = poids de la terre excavée x volume d'une tonne de terre excavée en pisé

189 tonnes x 0,4 m³/tonne = 75,60 m³

4. Calcul de la surface du mur :

Épaisseur supposée du mur : 40 cm (0,4 m)

Volume du mur en pisé potentiel / épaisseur du mur = surface du mur

75,60 m³ / 0,4 m = 189 m²

Avec 189 tonnes de terre excavée, on pourrait donc construire un mur en pisé de 75,60 m³. Avec une largeur de mur de 40 cm, cela correspond à une surface de 189 m². Dans notre exemple, avec cette excavation dans des conditions parfaites, une grande partie de la façade pourrait être construite.

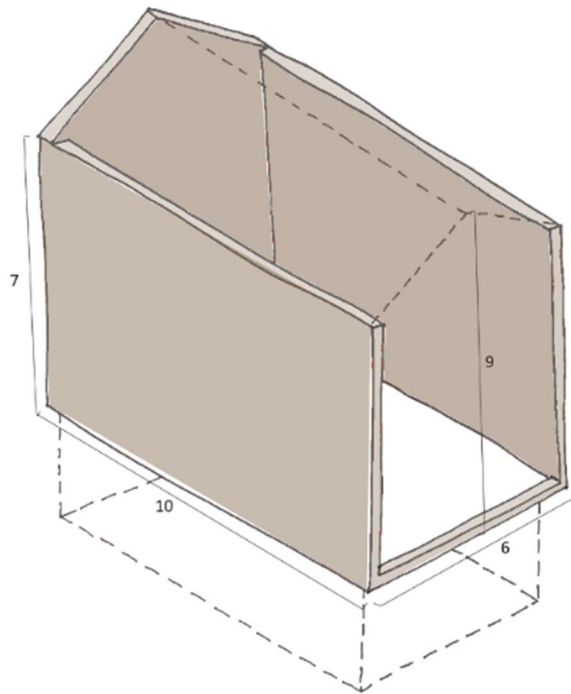


Figure 64 : Deuxième cas, maison avec cave © illustration personnelle

Le potentiel pour la production locale sur chantier

Pour comparer les deux scénarios, nous utilisons également les schémas pour illustrer le nombre de m². **Les ouvertures des fenêtres, des portes et des garages ne sont pas prises en compte et les façades ont donc une surface totale de 236 m².**

1. Dans le premier cas, sur la surface totale de la façade de 236 m², environ 35 m² pourraient être produits en pisé, ce qui ne représente que 15 % de la façade.
2. Dans le deuxième cas, trois murs entiers pourraient être construits en pisé. Sur la surface totale de la façade de 236 m², environ 189 m² pourraient être produits en pisé, ce qui représente 80% de la façade.

Par conséquent, si l'on tenait compte des surfaces des différentes ouvertures et qu'on les déduisait, on pourrait construire presque toute la surface de la façade en pisé.

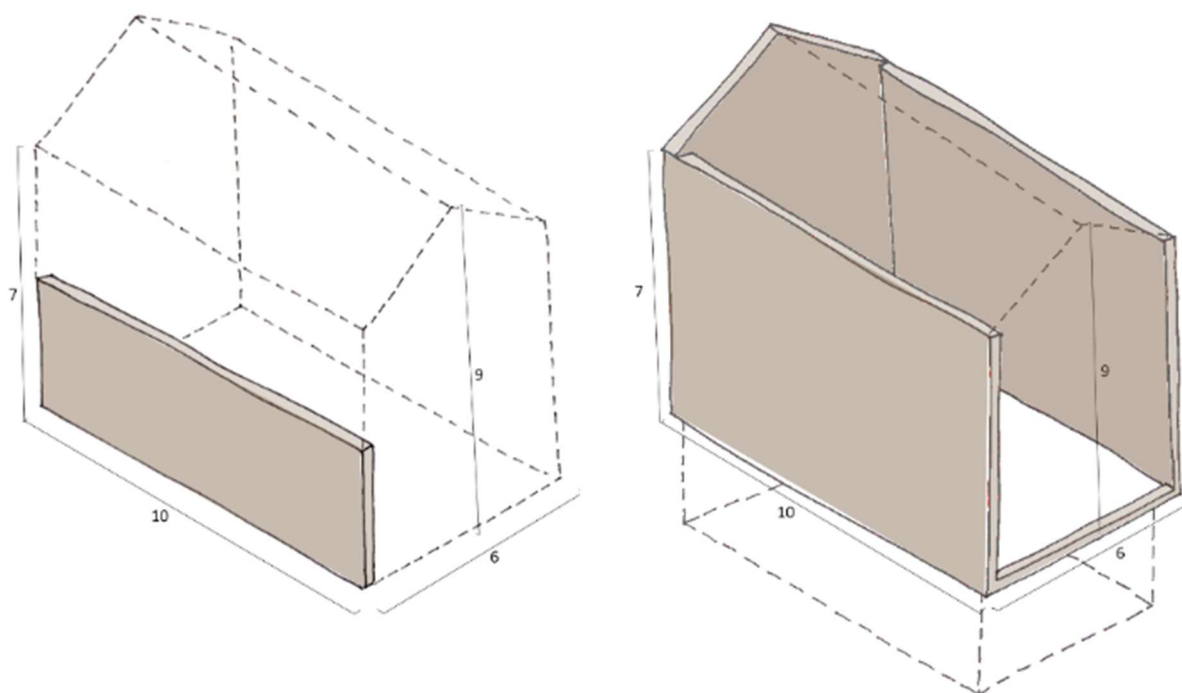


Figure 65 : Comparaison des deux cas © illustration personnelle

Si l'on considère que la construction d'une maison génère plus d'excavation que ce qui a été calculé ici, car il faut également creuser pour différentes conduites, tranchées, etc., on peut dire que **dans certains cas**, il existe probablement un **potentiel relativement important de réutilisation locale des déblais pour des matériaux de construction en argile**.

Il n'est néanmoins pas possible de construire toute la maison (donc aussi les murs intérieurs, etc.) avec cette terre, car la quantité n'est pas suffisante, mais dans certains cas, une partie importante de la maison pourrait déjà être recouverte de matériaux de construction en terre crue.

Cependant, comme la terre en Wallonie n'est pas partout parfaitement adaptée à la transformation locale, il peut être pertinent d'examiner comment les chiffres évoluent si l'on regarde le potentiel de terre qui est évacué chaque année en Wallonie des différents chantiers, stocké et ensuite considéré comme « déchet ».

En France, il existe un projet visant à valoriser les « déchets de terrassement » et à les transformer en matériaux de terre crue dans une fabrique nouvellement construite. Il serait donc intéressant de voir si ce modèle pourrait être reproduit en Wallonie, et ainsi ne pas regarder localement sur les chantiers, mais plutôt régionalement, quel serait le potentiel si l'on pouvait utiliser les terres excavées collectées en Wallonie pour la préfabrication des matériaux de construction en terre crue dans des installations appropriées.

Exemple du projet Cycle Terre en France

Cycle Terre est une expérience menée en France pour démontrer que les terres excavées sur les chantiers peuvent être utilisées comme ressource clé pour la production de matériaux de construction et de rénovation urbaine respectueux de l'environnement. Cette solution présente deux avantages :

1. Premièrement, elle remplace partiellement les matériaux traditionnels, dont la plupart proviennent de la cuisson de matériaux (tels que le ciment, les métaux, la terre cuite, les polymères, etc.), qui consomment beaucoup d'énergie, pour différents usages dans la construction (par exemple, murs intérieurs, cloisons, remplissage de façades, etc.), ce qui réduit considérablement l'empreinte carbone (énergie grise) du secteur de la construction.
2. Le second objectif est de réintégrer cette ressource, actuellement considérée comme un déchet à éliminer et à stocker, dans un cycle local des matériaux qui soit réellement durable (Loiret, 2021).

Cette expérience, lauréate de l'initiative européenne Urban Innovative Actions, a pour objectif de réutiliser et de valoriser les terres extraites de la région du Grand Paris pour produire des matériaux de construction respectueux de l'environnement. Pour ce faire, une usine de matériaux bruts a été conçue et construite à Sevran (France) dans laquelle sont produits depuis octobre 2021 des revêtements, des mortiers mais aussi des blocs de terre.

Outre la construction de l'usine, des mesures de structuration ont été nécessaires pour intégrer le projet dans l'écosystème local. Il s'agissait notamment de normaliser et de certifier les matériaux de construction en fonction de leurs performances techniques, de réaliser un bilan écologique intégrant un calcul de l'empreinte écologique et de former les architectes et les acteurs de la construction.

Il s'agit donc d'inverser la logique : Plutôt que de chercher une ressource adaptée aux processus, il est question d'élaborer des méthodes et des processus qui s'adaptent aux matériaux de construction existants. Pour cela, la terre est collectée, stockée et triée en fonction de ses caractéristiques géologiques et mécaniques afin d'être mieux traitée par la suite (Cycle Terre, 2021).

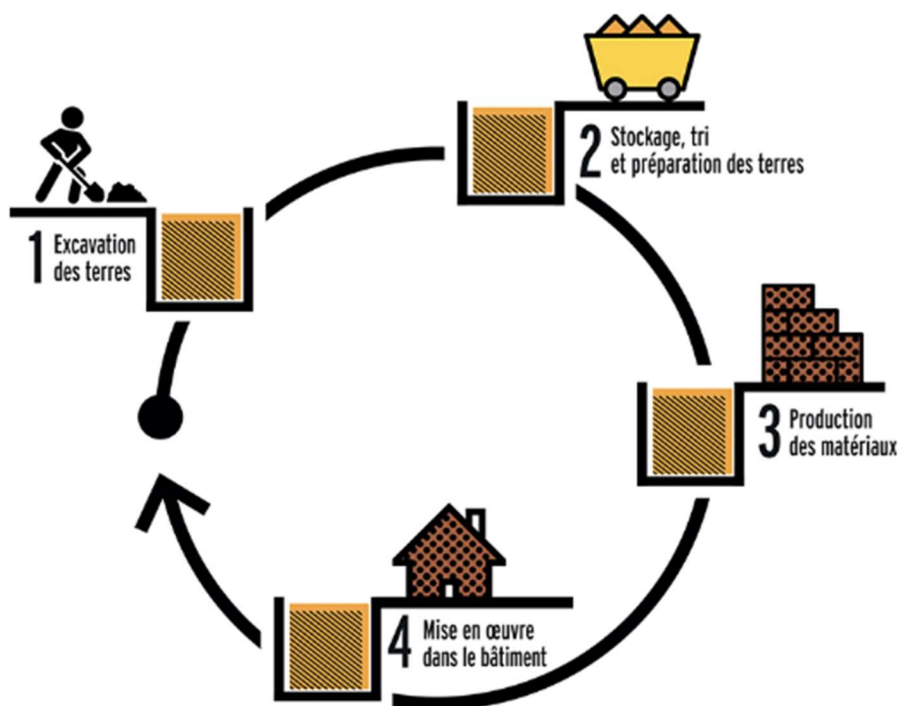


Figure 66 : Processus © Cycle Terre

L'expérience vise ainsi 6 objectifs pour la filière terre crue :

1. Trois lignes de production de matériaux de construction en terre sont prévues, visant à produire de 3 à 6 matériaux. Cette diversité permettra de traiter un plus grand pourcentage de la terre extraite et de produire des matériaux qui pourront être utilisés dans une large gamme d'ouvrages en complément d'autres matériaux.
2. Ils souhaitent produire des références techniques pour la construction en terre. Un organisme de certification français a déjà produit la certification pour les blocs en terre crue, les panneaux en terre crue et les mortiers.
3. Afin de tester et de développer l'utilité et l'utilisation des matériaux, il convient de collaborer avec des architectes et des promoteurs immobiliers.
4. Impliquer les entrepreneurs locaux, embaucher et former des personnes. Pour diffuser et faire connaître les matériaux de plus en plus largement.
5. Proposer des matériaux ayant un impact environnemental très faible et donc une alternative aux matériaux traditionnels.
6. Si tout se passe bien, cette expérience sera étendue à d'autres régions du Grand Paris et même à d'autres villes européennes (le Maire, s.d.).

Valorisation des déchets

En 1995, le Gouvernement wallon a imposé pour la première fois la tenue de bordereaux d'élimination des déchets, y compris les terres, lors de travaux publics. L'objectif étant de parvenir à un équilibre entre déblais et remblais (SPW ; Intertek RDC S.A. ; CONVERTO, 2012).

Il existe tout un ensemble de règles concernant l'utilisation et le contrôle de la terre. Dans ce travail, nous n'entrerons toutefois pas dans les détails. Si, à la fin de ce travail, l'analyse conclut que les déblais représentent un potentiel pour la transformation en matériaux terreux, il faudrait effectuer des recherches supplémentaires et, entre autres, examiner et intégrer de plus près par exemple les contrôles de qualité tels que le Rapport de qualité des terres (RQT). Nous avons toutefois noté ci-dessous quelques informations importantes d'un point de vue général.

Aujourd'hui, les terres excavées et leur utilisation sont réglementées par le décret du 14 juin 2001. Il s'agit du décret visant à promouvoir la valorisation de certains déchets qui sont amenés dans différents **centres d'enfouissement technique (CET)** où ils sont stockés et traités (SPW; Intertek RDC S.A.; CONVERTO, 2012). Outre les terres excavées, ces centres traitent les déchets ultimes, c'est-à-dire les déchets qui ne permettent pas une valorisation énergétique ou un recyclage. En Wallonie, il existe 12 centres de ce type (SPW, s.d.).

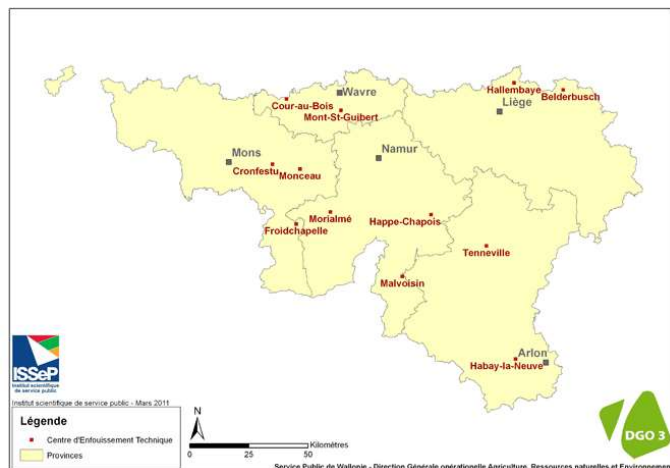


Figure 67 : Centre d'Enfouissement Technique en Wallonie © SPW

Le décret distingue les terres excavées contaminées des terres excavées décontaminées, en fonction des normes en vigueur et des utilisations possibles (SPW ; Intertek RDC S.A. ; CONVERTO, 2012).

En ce qui concerne les conditions de regroupement des terres, l'article 18 de l'Arrêté du Gouvernement wallon stipule que seuls deux types de terres peuvent faire l'objet d'un regroupement (Département du sol et des déchets (SPW ARNE), 2022).

- Terres pour lesquelles un certificat de contrôle de la qualité des terres a été délivré.
- Terres pour lesquelles aucun contrôle de qualité n'est requis (Département du sol et des déchets (SPW ARNE), 2022).

C'est pourquoi, dans les CET, les terres excavées sont également divisées en deux catégories : terres de déblais et terres décontaminées :

- **Terres de déblais** : La gestion des terres excavées ne nécessite pas de comptabilité particulière ni de certificat d'exploitation. Il s'agit de la récupération et de l'utilisation de terres naturelles issues d'aménagements paysagers, de travaux publics ou d'exploitations minières. Ce sont des terres naturelles non contaminées.
- **Terres décontaminées** : L'utilisation des terres décontaminées nécessite la tenue d'une comptabilité et le respect de règles définies dans un certificat d'utilisation. C'est l'utilisation et la récupération des terres d'une installation autorisée pour la décontamination spécifique des terres polluées (SPW ; Intertek RDC S.A. ; CONVERTO, 2012).

Les deux types de terres excavées sont actuellement utilisés en Wallonie pour différentes applications. D'abord, pour des travaux de remblayage, ensuite, pour l'assainissement d'anciens sites pollués ou contaminés selon une procédure approuvée par la Région et, enfin, pour la création et l'assainissement de centres d'enfouissement technique et pour des travaux de confinement. A cet effet, les *terres de déblais* sont utilisées sur des sites situés dans des zones destinées à être urbanisées et les *terres décontaminées* uniquement dans des zones commerciales à caractère industriel (SPW ; Intertek RDC S.A. ; CONVERTO, 2012).

Le 18 mars 2004, un décret a été adopté, interdisant le dépôt de certains déchets inertes provenant de travaux de construction et de démolition dans un CET. Toutefois, les sols et les terres n'entrent pas dans cette catégorie compte tenu des quantités de terres excavées et, en raison des besoins de l'industrie de la construction, il a été décidé que le dépôt de terres excavées dans des CET devait rester possible (SPW ; Intertek RDC S.A. ; CONVERTO, 2012). Cette décision montre que l'industrie de la construction génère une grande quantité de terres excavées qui n'ont pas d'autre utilisation et qui ont donc absolument besoin d'un endroit où elles peuvent être amenées et stockées, raison pour laquelle elles restent autorisées dans les CET.

Si les terres excavées peuvent être utilisées pour la production de matériaux de construction tels que la terre crue, cela pourrait réduire considérablement la pression sur les CET et offrir une alternative plus durable pour la gestion de ces matériaux.

Sites récepteurs et installations autorisées par Walterre

Comme mentionné dans l'introduction, il existe en Wallonie l'entreprise Walterre, reconnue par le Gouvernement wallon en mars 2019, qui joue un rôle essentiel dans la gestion et la traçabilité des terres en Wallonie. En plus des CET, l'entreprise Walterre distingue deux autres types de gestion des terres excavées. Il s'agit d'une part des sites récepteurs (SR) et d'autre part des installations autorisées (IA).

Un **site récepteur (SR)** est le lieu où les sols doivent être valorisés, la destination finale. Il peut s'agir de différents lieux : une carrière qui doit être remblayée, un site d'infiltration autorisé ou encore un terrain qui doit être nivelé (asbl Walterre, 2023).

Une **installation autorisée (IA)** est temporaire et peut être considérée comme une étape intermédiaire entre l'évacuation des terres des chantiers et leur valorisation sur un autre site. Ce type d'installation sert au stockage temporaire, au tri, à la préparation et/ou au prétraitement des sols conformément à la législation en vigueur.

Pour notre analyse, nous regardons les mouvements de terre de l'année passée, qui ont été notés par Walterre. En 2022, les mouvements de terre suivants ont été effectués :

- 3,5 millions de m³ vers des SR
- 1,3 millions de m³ vers des IA
- 190 mille m³ vers des CET
- 102 mille m³ hors Wallonie

Pour ces valeurs, il convient de noter que le volume réellement transporté n'est pas toujours connu de Walterre, car tous les documents de transport n'ont pas reçu d'accusé de réception (asbl Walterre, 2022).

Ce qui ne nous intéresse pas pour faire les calculs, c'est la terre qui a été transportée en dehors de la Wallonie ou qui est déjà réutilisée à certaines fins dans différents sites récepteurs. Ainsi, en 2022, environ 1,5 million de m³ de terres excavées ont donc été transportées vers des sites où elles seront d'abord transportées et ensuite stockées en tant que déchets.

Le potentiel d'utilisation des déblais pour la construction

Afin de déterminer le potentiel d'utiliser les déblais pour le secteur de la construction, nous faisons un calcul pour l'année 2022.

Pour ce faire, nous examinons combien de terres excavées ont été évacuées des chantiers en 2022 et déposées dans des dépôts en tant que déchets. Il faut cependant tenir compte du fait que ce travail part du principe que la totalité de la terre transportée peut être utilisée pour la production de matériaux de construction en terre crue. Il se peut néanmoins que toutes les terres de déblai ne répondent pas aux exigences et ne puissent donc pas être utilisées dans la pratique pour la production. De plus, il y a un gros stock de terre dans les différents points de collecte, qui n'est pas pris en compte dans les calculs, car le stock est éventuellement épuisé et il est intéressant de savoir combien de matériaux de construction peuvent être produits par an avec la terre extraite cette année-là.

Dans un premier temps, nous regardons combien de demandes de permis de construire ont été acceptées en Wallonie pour les nouvelles constructions résidentielles. Pour simplifier et limiter le calcul, nous nous référons uniquement aux chiffres des nouveaux bâtiments résidentiels et non à ceux des appartements et des immeubles d'appartements.

Dans un deuxième temps, nous examinons le nombre de permis de bâtir délivrés en 2022 pour des rénovations dans le secteur résidentiel. C'est particulièrement intéressant parce que les travaux de transformation et de rénovation seront de plus en plus fréquents à l'avenir.

Dans un troisième temps, nous considérons les deux cas ensemble, nous prenons en compte à la fois les permis pour les habitations et les permis pour les rénovations.

Dans les trois cas, nous établissons le calcul qui indique la quantité de pisé dont chaque maison dispose potentiellement :

Calculer combien de m³ de mur en pisé peuvent être produits avec la terre transportée en 2022 en Wallonie vers les différents sites de dépôt et combien cela donne par nouvelle habitation et par rénovation pour lesquelles un permis a été délivré en 2022 en Wallonie ?

Données pour le calcul :

- Terre transportée utilisable en 2022 : 1,5 million de m³ (asbl Walterre, 2022), (soit environ 1,5 million de tonnes).
- 1 tonne de terre donne 0,4 m³ de pisé (BC materials, 2019).

Calcul de la quantité totale de pisé : 1 500 000 tonnes de terre x 0,4 m³ = 600 000 m³ de pisé.

Selon les calculs, l'ensemble des déblais transportés en 2022, qui pourraient potentiellement être utilisés pour la transformation en matériaux de construction, donneraient des **murs en pisé d'un volume total de 600 000 m³**.

Premier cas : maisons d'habitation

- En 2022, 7 111 nouvelles habitations ont reçu un permis de construire en Wallonie (Statbel, 2022).

Répartition du volume total : 600 000 m³ de pisé / 7 111 nouvelles habitations = 84 m³ par habitation.

Théoriquement, cela signifie que chaque nouvelle maison d'habitation en Wallonie aurait disposé de 84 m³ de mur en pisé en 2022.

Sur un mur de 40 cm d'épaisseur, cela représenterait une surface de 210 m², soit 89 % de la surface totale de la façade (sans les ouvertures) dans notre exemple.

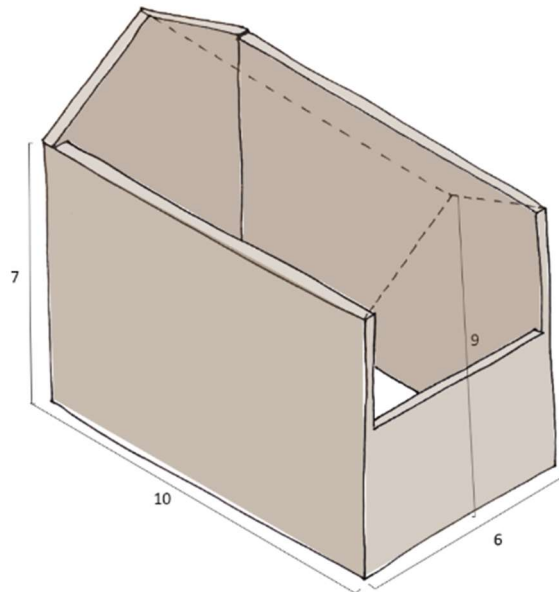


Figure 68 : Premier cas, nouvelles habitations © illustration personnelle

Deuxième cas : rénovations

- En 2022, 8 841 rénovations ont reçu un permis de construire en Wallonie (Statbel, 2022).

Répartition du volume total : 600 000 m³ de pisé / 8 841 rénovations = 68 m³ par rénovation.

Si le pisé généré par la terre transportée en 2022 était réparti uniquement entre les rénovations ayant obtenu un permis en 2022 en Wallonie, chacune de ces rénovations pourrait bénéficier de 68 m³ de pisé.

Sur un mur de 40 cm d'épaisseur, 68 m³ représentent une surface de 170 m². Dans notre exemple, cela représente 72 % de la surface totale de la façade (sans les ouvertures).

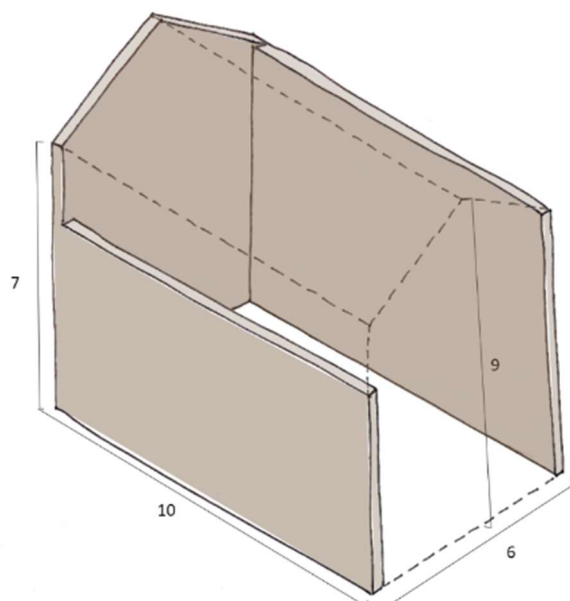


Figure 69 : Deuxième cas, rénovations © illustration personnelle

Troisième cas : habitations nouvelles et rénovations

- En 2022, 15 952 permis ont été délivrés en Wallonie pour des maisons neuves et des rénovations combinées (Statbel, 2022).

Répartition du volume total : $600\,000\text{ m}^3$ de pisé / 15 952 rénovations = 38 m^3 par rénovation.

Si le pisé généré par la terre transportée en 2022 était réparti uniquement entre les nouvelles habitations et les rénovations ayant obtenu un permis en 2022 en Wallonie, chacune de ces constructions pourrait bénéficier de 38 m^3 de pisé.

Sur un mur de 40 cm d'épaisseur, 38 m^3 représentent une surface de 95 m^2 . Dans notre exemple, cela représente 40 % de la surface totale de la façade (sans les ouvertures).

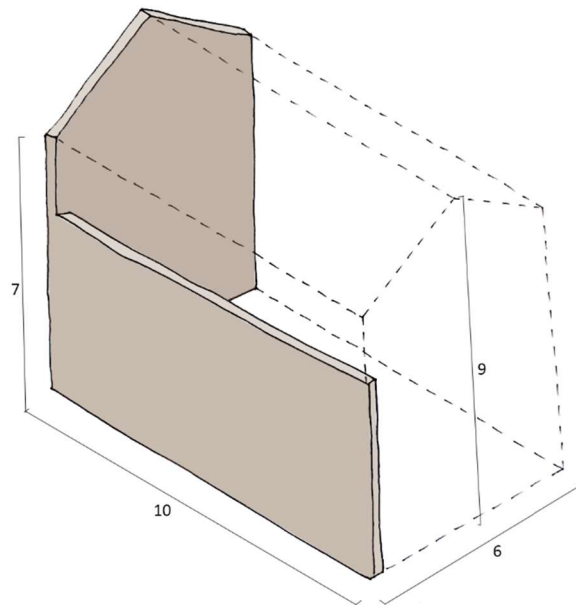


Figure 70 : Troisième cas, habitations et rénovations © illustration personnelle

Analyse comparative

Tout d'abord, il est important de noter une fois de plus qu'il s'agit de calculs théoriques et que d'autres facteurs doivent également être pris en compte, tels que les contraintes techniques, les règles de construction, les préférences du maître d'ouvrage, les coûts etc. Néanmoins, les calculs donnent un aperçu du volume potentiel de pisé qui pourrait être extrait des terres excavées existantes et montrent qu'il existe un potentiel non négligeable de réutilisation de ces « déchets » de terre.

Sur la base des calculs hypothétiques effectués, l'analyse comparative examine, d'une part, le potentiel de l'utilisation locale des déblais directement sur le chantier et, d'autre part, comment le potentiel évolue lorsque les déblais sont d'abord collectés puis transformés en matériaux de construction dans des usines.

Afin de mieux pouvoir comparer les différents scénarios, le potentiel est illustré par un croquis schématique. Il s'agit d'un bâtiment de 10 m x 6 m, d'une hauteur à la gouttière de 7 m et d'une hauteur au faîte de 9 m, dont les murs de façade ont une largeur de 40 cm. Pour faire des comparaisons, voyons quel pourcentage de la façade, qui a une surface totale de 236 m², pourrait être couvert par les terres excavées.

Dans le premier scénario, un calcul a été fait pour une maison sans sous-sol. Si cette excavation était réutilisée directement sur le chantier, elle ne permettrait de construire qu'une surface équivalente à **15 % des façades**. Le potentiel de transformation locale dans ce cas est donc très faible.

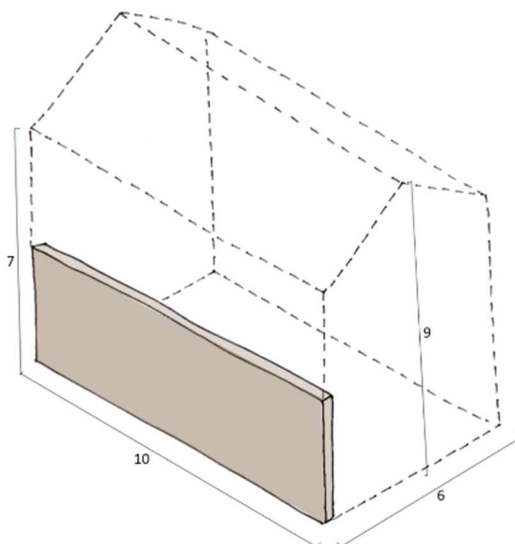


Figure 71 : © illustration personnelle

Dans le deuxième scénario, nous regardons également le potentiel de traitement sur le chantier, mais cette fois la maison a une cave, c'est pourquoi plus de terre est excavée. Dans ce scénario, la terre excavée pourrait couvrir **80 % de la surface totale**, ce qui représente donc un potentiel relativement important pour remplacer en partie les matériaux de construction traditionnels par des matériaux terreux. Il convient toutefois de noter qu'il s'agit là d'un scénario hypothétique ; dans la réalité, toutes les excavations ne sont pas nécessairement adaptées au traitement du pisé, en raison des différentes caractéristiques du sol. Ainsi, le potentiel est assez important en théorie, mais pas forcément dans la pratique.

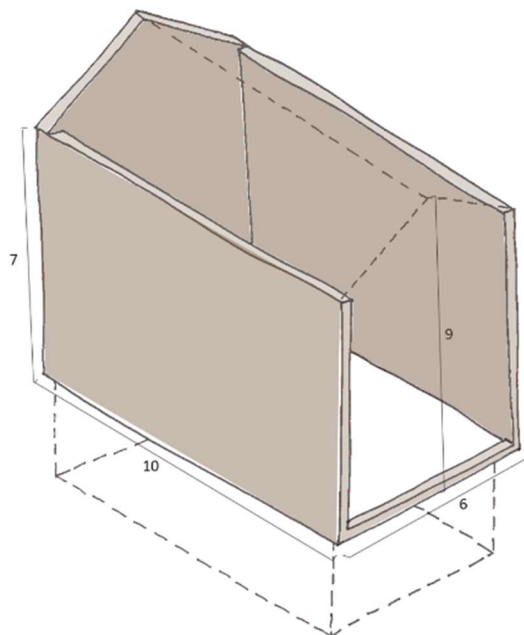


Figure 72 : © illustration personnelle

Les scénarios suivants examinent le potentiel si les déblais potentiellement utilisables de Wallonie sont collectés et ensuite transformés en pisé. Pour ce faire, les calculs ont été effectués sur la base de la quantité de déblais transportés en 2022. Il s'agit de calculer la quantité de pisé que l'on pourrait potentiellement produire avec cette terre et d'estimer le potentiel du nombre de permis de construire délivrés en 2022.

Dans le premier scénario, cela a été calculé pour le nombre de permis de construire pour de nouvelles habitations. Afin de mieux comparer le potentiel avec les calculs précédents, nous utilisons le même schéma. Chacune des maisons ayant obtenu son permis en 2022 pourrait bénéficier de 84 m³ de pisé, ce qui représente dans cet exemple **89 % de la façade totale** (210 m² sur 236 m²).

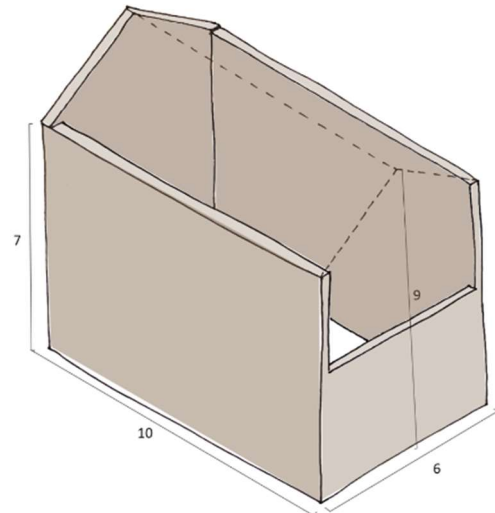


Figure 73 : © illustration personnelle

Dans le deuxième scénario, ce calcul a été fait pour toutes les rénovations ayant obtenu leur permis en 2022. Dans ce cas, chaque rénovation pourrait utiliser 68 m³ de pisé, ce qui représente dans notre exemple **une surface de façade de 72 %**.

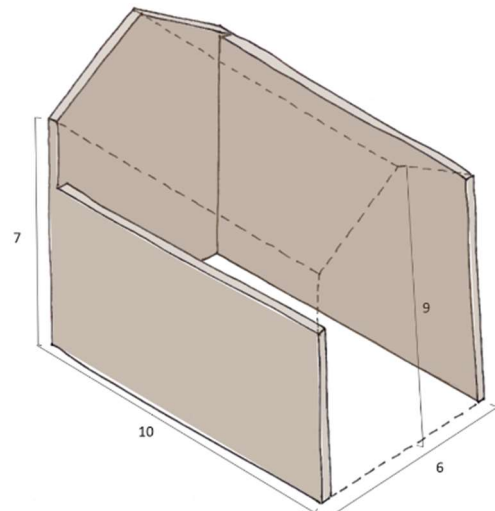


Figure 74 : © illustration personnelle

Dans le dernier scénario, nous avons relativisé les chiffres en regardant combien de matériaux terreux chaque maison avait à sa disposition, si les nouvelles habitations ainsi que les rénovations étaient prises en compte. Dans ce cas, chacune de ces demandes de construction disposerait de 38 m³, ce qui représente **40 % de la surface totale** de la façade.

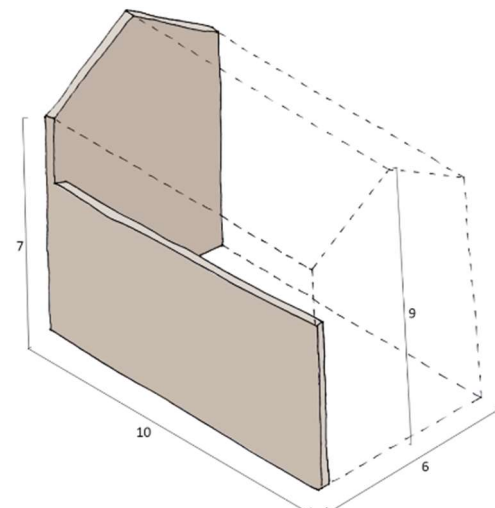


Figure 75 : © illustration personnelle

Ici encore, il convient de noter que les chiffres peuvent varier dans la réalité, car toutes les excavations ne sont peut-être pas adaptées à la production de matériaux de construction.

La comparaison de tous ces résultats issus de différents scénarios montre qu'il existe un potentiel en termes de quantité de terre excavée. En particulier si cette terre excavée est collectée et utilisée ensuite comme matériau de construction. Même si dans le dernier cas, où l'on a cherché ensemble des maisons neuves et des rénovations, on a atteint seulement 40 %, cette approche a l'avantage de mélanger les sols collectés et de les rendre ainsi plus adaptés au traitement. En mélangeant différentes sources d'excavation, il est possible de combiner différentes caractéristiques de sol, ce qui peut conduire à une meilleure qualité de traitement. Ainsi, il serait également possible d'utiliser des déblais qui, autrement, ne présenteraient pas les bonnes caractéristiques pour la production sur le chantier. En outre, on peut supposer que tout le monde n'aurait pas recours à ce type de sol, de sorte qu'en réalité, tous ceux qui souhaitent utiliser le sol disposeraient probablement de plus de 40 % de leur façade en pisé.

La terre collectée en Wallonie n'est pas seulement constituée de la terre extraite des habitations privées, mais aussi des travaux publics, comme les travaux routiers ou ferroviaires. Il est donc intéressant de le noter étant donné qu'en Wallonie, l'objectif est d'atteindre un « Stop au béton » d'ici 2050 et de limiter au maximum les nouvelles constructions (Lefèvre, 2018). La variante consistant à collecter, transformer et ensuite diffuser l'ensemble des déblais produits en Wallonie est donc beaucoup plus intéressante dans ce cas, car les travaux de rénovation qui sont encouragés ne produisent plus autant de terre excavée que les nouvelles constructions, de sorte que les déblais produits lors des travaux de rénovation ne représentent guère de potentiel à être transformés en matériaux de construction en terre.

« Stop au béton » - artificialisation et étalement urbain observables en Wallonie

Comme mentionné ci-avant, la Wallonie prévoit un « Stop au béton » d'ici 2050. Cette mesure vise à limiter l'urbanisation galopante dans les zones rurales. La stratégie prévoit de limiter l'extension des surfaces urbanisées à 6 km² par an d'ici 2025. À partir de 2050, plus aucune surface non urbanisée ne pourra être utilisée pour des projets d'habitation, d'industrie ou d'infrastructure.

La raison principale de cette mesure est l'impact environnemental que l'urbanisation entraîne. La construction de surfaces provoque des modifications artificielles du territoire et a de multiples effets sur l'environnement. Il s'agit notamment de la perte de ressources naturelles et agricoles, de l'imperméabilisation des sols, des modifications du cycle de l'eau et de la fragmentation des habitats naturels (Lefèvre, 2018).

Le taux d'artificialisation en Wallonie est d'environ 15% (en comparaison, il est de 33% en Flandre). Ce chiffre représente une artificialisation moyenne entre 2020 et 2021 de 12km²/an. Sur ce total, la part utilisée par le secteur résidentiel est d'environ 70%.

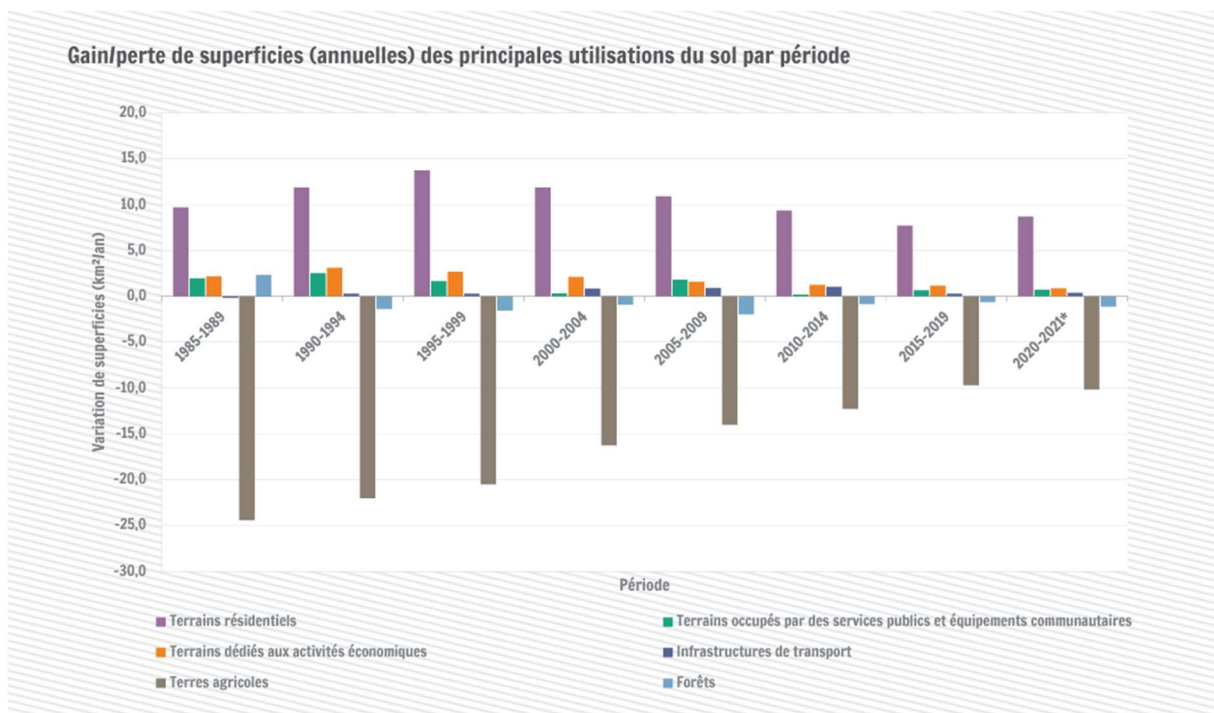


Figure 76 : Utilisation du sol © Iweps

Définition terrain artificialisé : « On entend par terrain artificialisé toute surface retirée de son état naturel (prairie naturelle, zone humide, etc.), forestier ou agricole, qu'elle soit bâtie ou non et qu'elle soit revêtue (exemple : parking) ou non (exemple : jardin de maison, pavillonnaire). Les surfaces artificialisées incluent donc également les espaces artificialisés non bâtis (espaces verts urbains, équipements sportifs et de loisir, etc.) et peuvent se situer hors des aires urbaines, la périphérie de villes de moindre importance voire de villages, à proximité des dessertes du réseau d'infrastructures, ou encore en pleine campagne (phénomène d'urbanisme diffus). » (Iweps, 2022)

Ou, plus brièvement, dans le projet SDT « processus par lequel des surfaces sont retirées de leur état naturel, forestier ou agricole ».

En 2017, la Wallonie a élaboré un schéma de développement du territoire (SDT). Le terme « artificialisation des terres » y a été utilisé pour la première fois, ainsi que l'objectif de l'arrêter complètement d'ici 2050.

L'objectif européen de 2011 est de ne pas avoir d'augmentation nette des surfaces artificialisées d'ici 2050.

L'objectif formulé dans le SDT (2019) est de réduire la consommation de terres non artificialisées à 6 km²/an d'ici 2030, soit la moitié de la surface actuellement artificialisée, et à 0 km²/an d'ici 2050. D'autres mesures ont été intégrées dans le projet de SDT, comme la mise à disposition de 175 000 nouveaux logements d'ici 2030, mais dont au moins 50% sur des terres déjà artificialisées, et la construction de 350 000 nouveaux logements d'ici 2050 sur des terres déjà artificialisées, donc sur des terres qui ont déjà été construites et/ou modifiées.

L'objectif est de localiser 50% des nouveaux logements dans les centres ruraux et urbains d'ici 2030 et 75% d'ici 2050.

En Wallonie, on constate que le parc bâti est sous-occupé et souvent en ruine. De plus, les prévisions démographiques sont régulièrement revues à la baisse. Et la taille des ménages ne cesse elle aussi de diminuer. Malgré cela, on continue à construire des maisons à quatre façades. Cette dynamique a pour conséquence d'accroître la dépendance à l'égard de la voiture, d'entraîner une fragmentation sociale et spatiale des territoires, de séparer les espaces de vie des espaces agricoles et de privatiser la plupart des vues sur les paysages ouverts (Ruelle, Hendrickx, Defer, Lambotte, & Halleux, 2020).

Si nous avons tout de même choisi une maison à 4 façades pour notre analyse, c'est pour la simple raison qu'il est plus facile de comparer les différents calculs et de rendre les valeurs obtenues tangibles en se représentant immédiatement combien on pourrait construire avec la terre.

Conclusion

Pour pouvoir dire concrètement quel est le potentiel réel d'utilisation des terres excavées en Wallonie pour la production de matériaux de construction en terre crue, il faudrait encore analyser de nombreux autres aspects, ce qui dépasserait le cadre de ce travail.

Ce travail permet toutefois de donner une première estimation.

Pour l'environnement, mais aussi pour le bien-être des hommes, il est nécessaire que nous commençons à chercher des solutions qui soulagent notre planète et ses ressources au lieu de l'exploiter toujours plus. Depuis le 18^e siècle, dès le début de l'ère industrielle, le système économique linéaire prévaut. Les ressources sont exploitées, elles servent à fabriquer une multitude de produits qui sont jetés à la fin de leur durée de vie et n'ont alors plus aucune valeur. De plus, chaque étape de travail qui en découle consomme une énergie précieuse et donc des ressources, tout en produisant des déchets supplémentaires (Romnée & Vrijders, 2018). Comme notre planète ne dispose pas de ressources illimitées, il est important d'établir un nouveau système économique circulaire. Il est indispensable de changer les mentalités dans le secteur de la construction. En Belgique, les travaux de construction et de démolition génèrent environ 40% de la production totale de déchets et les travaux de construction et d'entretien représentent près de 50% du flux de matériaux (European Environment Agency, 2012 & 2015). Pour établir une économie circulaire dans le secteur de la construction, trois facteurs principaux doivent avant tout devenir la norme. D'abord, il convient de réfléchir, dès la conception du bâtiment, à la manière dont les matériaux utilisés peuvent être récupérés ou réutilisés après leur utilisation et leur durée de vie. Ensuite, l'« urban mining » devrait jouer un rôle de plus en plus important. Cela signifie que les bâtiments existants devraient être considérés comme des « mines » dont les matériaux et les déchets peuvent servir de ressources. Enfin, de nouveaux modèles économiques doivent voir le jour afin de promouvoir la création de valeur tout au long du cycle de vie des bâtiments et des matériaux et de créer de la valeur à partir des déchets (Romnée & Vrijders, 2018).

Dans ce contexte, il semblait intéressant d'examiner d'un peu plus près le matériau de construction qu'est la terre crue. En effet, la terre répond à l'un des principaux critères de la construction écologique et circulaire, car elle représente un cycle de vie qui s'auto-entretient. Après avoir été utilisée comme matériau de construction, la terre peut être facilement extraite et recyclée, soit pour être réutilisée comme matériau de construction, soit pour être simplement rendue à la terre (Schreckenbach, 2004). Elle est utilisée depuis plus de 11 millénaires dans l'architecture vernaculaire comme l'un des principaux matériaux, car elle a toujours été une ressource abondante et facilement accessible (Anger, 2011). Malheureusement, ce type de construction a presque totalement disparu en Europe et dans les pays occidentaux depuis la Seconde Guerre mondiale, étant donné qu'il était important de tout reconstruire rapidement après la guerre et les matériaux plus récents comme le béton étaient moins chers et plus rapides à utiliser. La construction en terre est tombée dans l'oubli et aujourd'hui, il n'y a malheureusement plus guère de professionnels qui proposent des constructions en terre (Bronchart, 2013). Cela s'explique aussi par les nombreux préjugés qui règnent sur ce matériau et ce mode de construction. Pourtant, la terre crue en tant que matériau de construction présente beaucoup d'avantages que l'on peut lire dans de nombreux ouvrages. Parmi ceux-ci, il y a des avantages environnementaux, des avantages techniques, comme son inertie ou sa capacité hygrothermique à retenir l'eau et à réguler l'humidité et la température, des aspects économiques, car la construction en terre pourrait favoriser l'économie locale, et bien d'autres encore.

La construction en terre peut prendre différentes formes puisqu'il existe des méthodes très variées. Dans ce travail, nous nous sommes limités à une seule méthode pour l'analyse, à savoir le pisé. Pour

le pisé, un coffrage est réalisé, dans lequel la terre est compactée au fur et à mesure en différentes couches. Si cette méthode est utilisée sur le chantier, cela peut prendre beaucoup de temps. C'est pourquoi Martin Rauch a développé la préproduction de blocs de terre battue. Il est ainsi possible de préproduire des éléments dans un hall de production, indépendamment des conditions météorologiques, de calculer plus précisément les délais et donc de réduire considérablement le temps de travail sur le chantier.

La préproduction est donc une étape intéressante pour intégrer de manière optimale la construction en terre crue dans les processus de construction industrialisés (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2018). C'est entre autres la raison pour laquelle, outre la question de savoir quel est le potentiel local de la terre excavée pour la production de matériaux de construction en terre crue, ce travail s'est penché sur le potentiel que représente la collecte et le tri de la terre excavée en Wallonie pour la transformer ensuite en matériaux de construction. Le projet « Cycle Terre » en France a servi d'exemple pour cette idée d'utiliser les déblais comme matériau pour la préproduction de matériaux de construction. Ce projet est une expérience dont le but est de démontrer que les déblais de chantier peuvent être utilisés comme ressource clé pour la production de matériaux de construction écologiques (Loiret, 2021). L'initiative, récompensée par le prix européen Urban Innovative Actions, vise à réutiliser les terres extraites dans la région du Grand Paris. Pour ce faire, une usine a été construite à Sevran, où sont fabriqués depuis octobre 2021 des revêtements, des mortiers, mais aussi des blocs de terre crue (Cycle Terre, 2021).

L'analyse a d'abord porté sur les caractéristiques de la terre en Wallonie et sur la possibilité de la transformer en matériaux de construction. Il s'est avéré qu'une partie de la Wallonie était plutôt moins adaptée, ce qui joue un rôle important dans la production locale sur le chantier et rend ce type de construction moins envisageable dans certaines zones. Pour la deuxième variante, où la terre excavée est collectée de toute la Wallonie et ensuite traitée, cela pose moins de problèmes, car la terre y est de toute façon triée en fonction de ses différentes caractéristiques et il est donc possible d'en utiliser toutes les propriétés, car tout est finalement mélangé dans les bonnes proportions pour la production.

Outre les propriétés de la terre, il faut également contrôler si la terre est polluée ou non. Pour cela, la banque de données sur l'état des sols (BDES) a été créée en 2019. Sur ce site Internet, il est possible de voir pour chaque parcelle en Wallonie si la terre y présente un risque de pollution des sols. Là encore, c'est davantage important pour l'utilisation des déblais localement sur le chantier que lorsque la terre est collectée. En effet, pour la préproduction et le traitement, la terre doit de toute façon être traitée et triée au préalable.

Dans notre analyse, nous avons effectué des calculs hypothétiques basés sur la supposition que les propriétés et les niveaux de pollution de la terre excavée sont appropriés pour la production de matériaux en terre crue. Il s'agit de déterminer s'il y a suffisamment de terre excavée pour envisager la possibilité d'utiliser les déblais comme matériau de construction. Si le potentiel existe, d'autres études de faisabilité pourraient être envisagées à l'avenir. Cette analyse ne tient pas compte délibérément d'autres facteurs tels que les coûts, le transport, la disponibilité des matériaux et les préférences des maîtres d'ouvrage, bien qu'ils puissent jouer un rôle important dans le potentiel réel.

Dans les deux premiers scénarios, le potentiel de traitement des déblais a été évalué localement sur le chantier. Pour ce faire, un exemple de maison a été utilisé et une surface de 70 m² a été considérée comme nécessaire pour la construction de cette maison.

Afin de pouvoir mieux comparer tous les calculs, le pourcentage de façades de la maison d'exemple qui pourraient être réalisées en pisé a été calculé pour une maison de 10 m x 6 m, avec une hauteur à

la gouttière de 7 m et une hauteur au faîte de 9 m. Pour les façades, il est supposé que l'épaisseur des murs est de 40 cm.

Dans le premier scénario, le calcul a été réalisé pour une maison sans sous-sol. Le résultat a été décevant. Seul un mur de 14 m³ pourrait être construit avec cette terre. Cela représente par exemple un mur de 3,5 m x 10 m ou, dans notre exemple, 15 % de la surface totale de la façade.

Par conséquent, il est possible de conclure qu'il n'y a pas un grand potentiel, si l'on considère que tous les autres facteurs que nous avons laissés de côté dans le calcul hypothétique s'y ajoutent.

Le deuxième scénario est plus positif. S'il s'agit d'une maison avec sous-sol, 80% de la surface de la façade pourrait être couverte dans notre exemple.

Dans ce cas, cela vaudrait la peine d'envisager, en tant que maître d'ouvrage, de faire des recherches pour savoir si la terre est appropriée et non polluée, puis de remplacer certains murs par du pisé et ainsi d'économiser une partie relativement importante des autres matériaux de construction.

Dans ce cas hypothétique où seule la quantité de terre excavée est importante, celle-ci pourrait être réutilisée. Cependant, il faut noter qu'il existe en Wallonie des sites où la terre ne se prête pas forcément à la production de pisé et qu'il n'est donc tout simplement pas possible de généraliser ces réponses et de dire quel est le potentiel réel.

Dans les autres scénarios, la quantité de terre excavée qui, selon Walterre, sera transportée en 2022 a été examinée. Pour cette quantité, il a été étudié à combien de m³ de terre excavée cela correspond et combien de m³ cela donne d'une part par nouvelle construction ayant obtenu le permis de construire en 2022 et, d'autre part, par rénovation ayant obtenu le permis en 2022.

En 2022, les données indiquent qu'un total de **1 500 000 tonnes de terre a été transporté**, qui n'est pas déjà utilisé pour d'autres dépenses, comme par exemple des travaux de remblayage. Si toute la terre est considérée comme utilisable pour la production, le calcul montre qu'un volume total **de 600 000 m³ de pisé** pourrait être produit avec cette terre transportée.

Si, pour le premier scénario, ce nombre de pisé est divisé par le nombre de nouvelles constructions ayant obtenu le permis en 2022, le résultat est que chaque nouvelle construction pourrait bénéficier de 84 m³ de pisé. Cela représente une surface de façades de 89 % de la surface totale de l'exemple de la maison.

Pour le deuxième scénario, qui considère la quantité pour les rénovations, un résultat de 68 m³ est obtenu, ce qui représente 72 % de la surface totale de la façade.

Ensuite, nous avons additionné le nombre de permis pour les nouveaux bâtiments et les rénovations afin de voir comment les chiffres évoluent. Dans ce cas, le résultat était bien sûr nettement plus petit, car la quantité de pisé reste la même, mais le nombre de permis est plus élevé. Le résultat de ce calcul est que chaque maison ou rénovation disposerait de 38 m³ de pisé si elles utilisaient toutes la terre transportée en 2022. Dans notre exemple, cela couvrirait une surface de façade de 40%.

L'un des principaux avantages de cette méthode réside dans le fait que les déblais sont triés dans les centres de collecte avant d'être traités. Ainsi, les propriétés individuelles des différents matériaux d'excavation jouent un rôle moins important. Grâce à ce tri ciblé des composants, le pisé peut toujours être produit dans des proportions optimales. Cela garantit une qualité constante du matériau de construction et maximise l'efficacité du traitement.

Dans ces calculs hypothétiques, nous supposons que toutes les maisons recevront une part de pisé qui peut être produite avec la terre qui a été transportée en 2022. Dans la réalité, tout le monde ne veut

pas forcément construire avec de la terre crue, ce qui signifie que les personnes qui veulent construire avec du pisé en ont d'autant plus à disposition et peuvent ainsi construire une plus grande partie de leur maison avec ce matériau, ce qui permet d'économiser des matériaux de construction habituels comme les blocs de béton.

D'un point de vue économique et circulaire, la transformation sur le chantier serait plus avantageuse, car il serait possible d'économiser les coûts et l'énergie du transport, du stockage intermédiaire, du tri et de la transformation. Cependant, la préproduction a l'avantage de permettre l'utilisation d'un plus grand nombre de déblais de terre, puisque tout est retraité et trié et que les caractéristiques des différents déblais de terre ne jouent donc pas un rôle aussi important. La préproduction présente également l'avantage que le temps de séchage se fait dans le hall de production, ce qui permet d'économiser un temps précieux sur le chantier. En outre, il est probable que la quantité de terre extraite soit bien plus importante que ce qui est actuellement comptabilisé. S'il existait un site de production approprié, il serait probablement possible d'utiliser plus de terre que dans les exemples précédents. Cela souligne le potentiel de cette ressource pour la production de matériaux de construction et montre que l'utilisation réelle pourrait être encore plus élevée que ce que nous avons analysé jusqu'à présent.

Il faut toutefois tenir compte des coûts de transport, de décontamination, de tri et de traitement, qui existent déjà aujourd'hui. La production de matériaux de construction aurait néanmoins l'avantage d'économiser les coûts, les ressources et l'énergie nécessaires à la production d'autres matériaux de construction.

Enfin : *Quel est le potentiel d'utilisation des terres excavées en Wallonie pour la production locale de matériaux de construction en terre crue ?*

Au terme de ce travail, il n'est pas si facile de répondre à cette question par un oui ou un non catégorique, car pour déterminer le potentiel réel, il faudrait examiner de plus près d'autres facteurs tels que les règles et les normes de construction, les procédés de fabrication, la formation des entrepreneurs et, surtout, la question des coûts et des avantages.

En définitive, mon appréciation personnelle est toutefois que la valorisation des terres excavées en Wallonie pour la production de matériaux de construction en terre crue peut contribuer de manière importante à la transition vers une construction plus durable et également à la réalisation des objectifs de la politique d'urbanisation wallonne en vue de « stop au béton ». Toutefois, des études et des évaluations de faisabilité supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la viabilité économique, technique et environnementale de ces approches. Bien que la terre ne puisse pas remplacer totalement les autres matériaux de construction, elle pourrait contribuer à économiser une part importante de ces matériaux et à réduire les ressources et l'énergie utilisées pour leur production.

Ce qui est sûr, c'est que l'engagement continu en faveur de nouvelles innovations, la collaboration intersectorielle et la recherche inlassable de nouvelles solutions joueront un rôle clé dans l'exploitation de tout le potentiel de l'utilisation des terres excavées pour la production de matériaux de construction en terre crue en Wallonie.

Bibliographie

Ouvrages

- Bavay, G., & Bronchart, S. (2011). Earthen architecture in Belgium. Dans M. Correia, L. Dipascuale, & S. Mecca, *Terra Europae - Earthen Architecture in the European Union* (pp. 89-91). Pisa: Edizioni ETS.
- Confédération de la construction en terre crue. (2020). *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue*. Paris : Confédération terre crue.
- Correia, M., Dipascuale, L., & Mecca, S. (2011). *Terra Europae - Earthen Architecture in the European Union*. Pisa : Edizioni ETS.
- CRATERre, Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en Terre*. Eybens: éditions Alternative et Parallèles, Collection AnArchitecture.
- Fontaine, L., Anger, R., Doat, P., Houben, H., & Van Damme, H. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Paris: Belin Cité des Sciences et de l'Industrie.
- Gauzin-Müller, D. (2018). *Lehmarchitektur Heute*. (K. Chavent, Trad.) Zürich: vdf Hochschulverlag AG.
- Guillaud, H., & Houben, H. (2006). *Traité de construction en terre* (éd. 4). Marseille: Editions Parenthèses.
- Kapfinger, O., & Sauer, M. (2017). *Martin Rauch - Gebaute Erde gestalten & konstruieren mit Stampflehm*. Munich : DETAIL.
- Minke, G. (2006). *Building With Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Kassel: Birkhäuser.
- Schreckenbach, H. (2004). *Building with Earth - Consumer information*. Weimar: Dachverband Lehm e.V.

Etudes scientifiques, rapports et mémoires de fin d'études

- Anger, R. (2011). *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction*. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, Lyon. Récupéré sur <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2011ISAL0154/these.pdf>
- Antoine, A.-L., & Carnevale, E. (2016). Architectures contemporaines en terre crue en France de 1976 à 2015: pourquoi et comment les acteurs construisent avec ce matériau aujourd'hui? *Architecture, aménagement de l'espace*.
- asbl Walterre. (2021). *Rapport Annuel*. Colfontaine: asbl Walterre.
- asbl Walterre. (2022). *Rapport Annuel*. Colfontaine: asbl Walterre.
- Aubert, J. E., Borderon, J., Daubas, L., de Menibus, A. H., & ... (2018). *Projet National Terre Crue*. France: Ministère de la transition écologique et solidaire.
- BC materials. (2019, novembre 19). Kastar - Circulaire stampleem mengeling. *Fiche technique*. Bruxelles.

- BC materials. (2022). Brickette - Brique de Terre Comprimée Circulaire. *Fiche technique*. Bruxelles.
- Benachio, G., Freitas, M., & Tavares, S. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- Ben-Alon, L., Loftness, V., Harries, K. A., Hameen, E. C., & Bridges, M. (2020). INTEGRATING EARTHEN BUILDING MATERIALS AND METHODS INTO MAINSTREAM CONSTRUCTION. *Journal of Green Building*, 15(1), 87-106. Récupéré sur <https://doi.org/10.3992/1943-4618.15.1.87>
- Ben-Alon, L., Loftness, V., Harries, K., & Hameen, E. (2020). Integrating earthen building materials and methods using perception surveys and life cycle assessment (LCA). *Lehm 2020*, 8. *Internationale Fachtagung für Lehmbau*.
- Bendixen, M., Best, J., Hackney, C., & Inversen, L. (2019). Time is running out for sand. *Nature*, 571, 29-31. Récupéré sur <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02042-4>
- Bronchart, S. (2013). Architectures de terre crue . *Conférence européenne Eco-Matériaux*. Bruxelles.
- Cabeza, L., Boquera, L., Chàfer, M., & Vérez, D. (2021). Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis. *Energy and Buildings*, 231. Consulté le février 14, 2023, sur <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110612>
- Cycle Terre. (2021). *Réplication du démonstrateur Cycle Terre*. Sevran.
- De Cooman, K. (2020). Zurück zur Erde: BC materials verwandelt städtischen Aushub in Baumaterial. *Lehm 2020*, 8. *Internationale Fachtagung für Lehmbau*.
- Département du sol et des déchets (SPW ARNE). (2022). *Guide de référence relatif à la gestion des terres - Version 2*. Liège: Issep.
- Depret, L. (2015). *LA TERRE CRUE, en route vers une architecture éco-responsable*. Mémoire. Bruxelles: LOCI Saint-Luc.
- European Environment Agency. (2012 & 2015). *European Environment State and Outlook: Material resources and waste*. Publications Office of the European Union.
- GlobalABC, IEA, & UNEP. (2018). *2018 Global Status Report*. Paris: IEA.
- GlobalABC, IEA, & UNEP. (2020). *GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Paris: IEA.
- Grigoletto, S., Paul, J., Lebeau, F., Courard, L., & Moutschen, P. (2015). *Applications de la terre crue en construction*. Douai, France: Paper presented at Conférence Internationale Francophone NoMad (Nouveaux Matériaux et Durabilité).
- Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., & Morel, J.-C. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment*, 106, 103-119. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>
- Iweps. (2022). *Les chiffres-clés de la Wallonie - Edition 2022*. Vottem: Snel Graphics SA.
- Klinge, A., Roswag-Klinge, E., Radéjlic, L., Bojic, D., & Neumann, E. (2020). Lehmbaustoffe als Chance zur Reduktion von Mineralischen Bau- und Abbruchabfällen (CDW). *Lehm 2020*, 8. *Internationale Fachtagung für Lehmbau*.

- Lanoie, P., & Normandin, D. (2015). L'économie circulaire - Au-delà de ses vertus environnementales, un modèle d'affaires. *GESTION*, 40, 90 à 95. Consulté le juin 12, 2023, sur <https://www.cairn.info/revue-gestion-2015-3-page-90.htm>
- Lkhamrichi, A. (2022). *Travail de fin d'étude : La Fresque de la Terre crue : un outil de sensibilisation pour déconstruire les préjugés et obstacles à l'utilisation de ce matériau en Belgique*. Liège, Université de Liège. Récupéré sur <http://hdl.handle.net/2268.2/16546>
- Loiret, P.-E. (2021, mars 26). Penser & construire avec les déblais de terre, ressource principale de nos villes. Le cas de Cycle Terre, première fabrique européenne de matériaux issue du recyclage des terres du Grand Paris. (M. d. Culture, Éd.) *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère*(11). Consulté le juin 27, 2023, sur <https://journals.openedition.org/craup/7218>
- MacArthur, McKinsey, & SUN. (2015). *Growth within : a circular economy vision for a competitive Europe*. Récupéré sur <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFou>
- Mack, G. (2014). *Ricola - Herzog & de Meuron - Sieben Bauten 1983-2014*. Laufen: Ricola AG.
- Niroumand Hamed, M.F.M, Z., & Maslina, J. (2013). A guideline for assessing of critical parameters on Earth architecture and Earth buildings as a sustainable architecture in various countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 130-165. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.020>
- Pollet, V., & Hanoteau, Y. (2018). *Valoriser les terres excavées des chantiers de construction en Wallonie*. Bruxelles: CSTC.
- Ponzoda, O. (s.d.). *L'AGW relatif à la gestion et à la traçabilité des terres*. Verviers: Fedexsol.
- Romnée, A., & Vrijders, J. (2018). *Vers une économie circulaire dans la construction - Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction*. Bruxelles: cstc.
- Ruelle, C., Hendrickx, S., Defer, V., Lambotte, J.-M., & Halleux, J.-M. (2020). *L'artificialisation en Wallonie, objet de débat*. Liège: Université de Liège.
- SPW; Intertek RDC S.A.; CONVERTO. (2012). *Rapport draft final : Centre d'enfouissement technique*. Bruxelles: Service Public de Wallonie.
- Van der Linden, J. (2019). *Unfired Earth in a post-industrial society*. Hasselt: UHasselt, faculty of Architecture and Arts.
- Van der Linden, J. (2021). Intégration de la construction en argile dans les projets architecturaux. *Séminaire Bâtiment Durable - Terre crue et constructions contemporaines à Bruxelles*. Bruxelles: BC materials - architects & studies, Bruxelles environnement.
- Van der Linden, J. (s.d.). *Présentation : Building with earth*. BC materials.
- Vilquin, T. (2021). Patrimoine de terre crue en Belgique - Un matériau oublié mais historiquement présent. *Séminaire Bâtiment Durable - Terre crue et constructions contemporaines à Bruxelles*. Bruxelles: ULB, Bruxelles environnements.

Articles et périodiques

Christofori, R. (2020). *Leben Mit Lehm*. *FESTOOL MAGAZIN*(N°7), 41-45.

CRAterre. (2023, mai). Newsletter mai. *CRAterre*. Consulté le juin 25, 2023, sur <https://craterre.hypotheses.org/5489>

Ressources internet

(APM) Architecture & Associé. (2017). *Pole Culturel Qe Passif Et Vnac Bois Et Terre | atelierphilippemadec*. Consulté le mars 10, 2023, sur (APM) Architecture & Associé: https://www.atelierphilippemadec.fr/architecture/culture/pole-culturel-_qe-passif-et-vnac-_bois-et-terre.html

ARGILUS. (s. d.). *Brique de Terre Crue ARGITECH® - ARGILUS - Enduits Terre*. Consulté le mai 2022, sur ARGILUS - Enduits Terre et Matériaux écologiques: <https://www.argilus.fr/produit/btc-argitech/>

asbl Walterre. (2022). *Organisation - Walterre*. Consulté le mars 2022, sur Walterre: <https://walterre.be/qui-sommes-nous/organisation/>

asbl Walterre. (2023). *Sites Récepteurs et Installations Autorisées*. Consulté le mars 26, 2023, sur Walterre: <https://walterre.be/informations/sria/>

BauNetz. (2015). *Besuchszentrum Schweizerische Vogelwarte Sempach*. Consulté le mars 06, 2023, sur Baunetz Wissen: <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/objekte/kultur-freizeit/besuchszentrum-schweizerische-vogelwarte-sempach-4566581>

BC architects & studies. (2023). *Introduction*. Consulté le mars 05, 2023, sur BC architects & studies: <https://bc-as.org/about/introduction>

BC materials. (2015). *Fort V*. Consulté le avril 06, 2023, sur BC materials: <https://bcmaterials.org/node/88>

BC materials. (2018). *Concept*. Consulté le mars 13, 2022, sur BC materials: https://www.bcmaterials.org/fr_11_concept.html

BC materials. (2018). *Produits*. Consulté le mai 23, 2022, sur BC Materials: https://www.bcmaterials.org/fr_12_produits.html

BC materials. (2022). *Chape-ter*. Consulté le avril 25, 2023, sur BC materials: <https://bcmaterials.org/node/149>

BC materials. (2022). *Concept - Why build with unfired earth?* Consulté le février 27, 2023, sur <https://bcmaterials.org/concept>

BC materials. (2023). *About Us*. Consulté le mars 05, 2023, sur BC materials: <https://bcmaterials.org/about-us>

BC materials. (s.d.). *FAQ*. Consulté le avril 02, 2023, sur BC materials: <https://bcmaterials.org/fr/node/51>

Bidel, A. (2017, août 29). *Les briques de terre crue (BTC)*. Consulté le mai 30, 2022, sur terre-alternative.fr: <https://terre-alternative.fr/index.php/2017/08/29/les-briques-de-terre-crue-btc/>

- Breschi, T. (2023, juin 08). *LUMA Arles' Lot 8: A Blueprint for Bioregional Architecture*. Consulté le juin 16, 2023, sur revalu: <https://www.revalu.io/blog/luma-arles-lot-8-a-blueprint-for-bioregional-architecture>
- Clément Vergély architectes. (2021). *ilot B2 - Lyon Confluence*. Consulté le août 05, 2023, sur Clément Vergély architectes: <http://www.vergelyarchitectes.com/ilot-b2-lyon-confluence/>
- CRAterre. (s.d.). *Accueil*. Consulté le janvier 16, 2023, sur CRAterre: <http://craterre.org/>
- Deweerd, M. (2020). *Introduction à l'économie circulaire dans la construction*. Consulté le mars 2022, sur cstc.be: <https://www.cstc.be/publications/cstc-videos/53/>
- Direction de la Protection des Sols du Service public de Wallonie. (s.d.). *Banque de Données de l'Etat des Sols wallons (BDES)*. Consulté le juillet 30, 2023, sur Sol et déchets en Wallonie: <https://sol.environnement.wallonie.be/bdes.html>
- Eder, T. (2017). *Baustoff Lehm Eigenschaften*. Consulté le mars 2022, sur Lehm in Farbe: <https://lehm-in-farbe.de/baustoff-lehm-eigenschaften/>
- Escape Away. (2023). *Granada Andalusien*. Consulté le août 05, 2023, sur Escape Away: <https://www.escapeaway.de/spanien/andalusien/granada>
- Etat de l'environnement wallon. (2018, janvier 16). *Principaux types de sols*. Consulté le mars 15, 2023, sur Etat de l'environnement wallon: <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/PHYS%204.html>
- European Parliament. (2023, mai 24). *Circular economy: definition, importance and benefits | News | European Parliament*. Consulté le juin 20, 2023, sur European Parliament: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>
- Fischer-Gertz, J. (s.d.). *Informationen zum Thema Lehm*. Consulté le mars 25, 2023, sur Der Bauladen - Natur zum Wohnen, Bauen, Leben: <https://www.bauladen-kirchheim.de/lehm/lehminfo.htm>
- hé! architectuur. (2022, février 18). *KARPER_huisje vol met stro_rammed earth & clay plasters*. Consulté le mars 15, 2023, sur Instagram: <https://www.instagram.com/p/CaHkbreNwaj/>
- hé! architectuur. (2022, juin 8). *OMLOOP_renovatie van een typische Vlaamse fermette*. Consulté le mars 15, 2023, sur Instagram: <https://www.instagram.com/p/CejkpleNZeW/>
- Jean, C. (2021, février 24). *La Grande mosquée de Djenné, un trésor à protéger*. Consulté le août 05, 2023, sur BeauxArts: <https://www.beauxarts.com/grand-format/la-grande-mosquee-de-djenne-un-tresor-a-proteger/>
- Le Maire, M. (s.d.). *Le projet*. Consulté le juillet 05, 2023, sur Cycle terre: <https://www.cycle-terre.eu/cycle-terre/le-projet/>
- Lehm Ton Erde Baukunst GmbH. (2000). *Druckerei Gugler*. Consulté le mars 14, 2023, sur Lehm Ton Erde: <https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pid=37>
- Lehm Ton Erde Baukunst GmbH. (2008). *Haus Rauch*. Consulté le mars 14, 2022, sur Lehm Ton Erde: <https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pid=7>
- Lehm Ton Erde Baukunst GmbH. (2010). *Stall Piazza Pintgia*. Consulté le mars 14, 2023, sur Lehm Ton Erde: <https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pid=34>

- Lehm Ton Erde Baukunst GmbH. (2014). *Besucherzentrum Schweizerische Vogelwarte*. Consulté le mars 15, 2023, sur Lehm Ton Erde : <https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pid=95>
- Lehm Ton Erde Baukunst GmbH. (2018). *Produkte - Stampflehmwand*. Consulté le mai 2022, sur Lehm Ton Erde: <https://www.lehmtonerde.at/de/produkte/produkt.php?aid=6>
- nunc architectes. (2014). *Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen - 67*. Consulté le mars 04, 2023, sur nunc architectes: <https://www.nunc.fr/centre-d-interpretation-du-patrimoine-archeologique-de-Dehlingen-67-169>
- OGIC. (2021, janvier 10). *Construire en terre crue? Une solution bioclimatique économe en énergie*. Consulté le mars 2022, sur OGIC - une nouvelle nature de ville: <https://www.groupe-ogic.fr/architecture-terre-crue/>
- Parlement européen. (2015, décembre 02). *Économie circulaire : définition, importance et bénéfices*. Consulté le avril 2022, sur Parlement européen: <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/economy/20151201STO05603/economie-circulaire-definition-importance-et-benefices>
- sanier.de. (2022, juillet 01). *Erdaushub entsorgen*. Consulté le juillet 08, 2023, sur sanier.de: <https://www.sanier.de/entsorgung/erdaushub-entsorgen>
- Service public de Wallonie. (2022). *Carte des Principaux Types de Sols de Wallonie à 1/250000*. Consulté le avril 05, 2023, sur Géoportail de la Wallonie: <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/64bbc088-367c-485c-bd7c-d2d08baedf9d.html>
- SPW. (2001, juin 14). *Arrêté du Gouvernement wallon favorisant la valorisation de certains déchets*. Consulté le janvier 15, 2023, sur Wallex: <https://wallex.wallonie.be/eli/arrete/2001/06/14/2001027388/2001/07/10>
- SPW. (s.d.). *Réseau de contrôle des Centres d'Enfouissement Technique en Wallonie*. Consulté le avril 02, 2023, sur Wallonie service public SPW: http://environnement.wallonie.be/data/dechets/cet/00intro/00_1mi.htm
- Statbel. (2022). *Permis de bâtir*. Consulté le juillet 10, 2023, sur <https://statbel.fgov.be/fr/themes/construction-logement/permis-de-batir#figures>
- TERRAFIBRA. (2021). *Palmarès du Terrafibra Award*. Consulté le mars 02, 2023, sur TERRAFIBRA Award: <https://www.terrafibraaward.com/portfolio-item/restauration-et-transformation-partielle-du-grand-theatre-de-geneve/>
- UNESCO Centre du patrimoine mondial. (s.d.). *Liste du patrimoine mondial*. Consulté le janvier 24, 2023, sur UNESCO Centre du patrimoine mondial: <https://whc.unesco.org/fr/list/?search=&themes=1&order=country>
- Union européenne. (2020, mars 11). *Circular Economy Action Plan*. Consulté le janvier 24, 2023, sur Parlement européen: <https://www.europarl.europa.eu/committees/de/circular-economy-action-plan-/product-details/20201106CDT04441>
- Verpoorten, B. (2023, mars 17). *Le Belge construit toujours plus petit : en 20 ans, la surface des maisons neuves a diminué de 25 m²*. Consulté le juillet 05, 2023, sur rtbf.be: <https://www.rtbf.be/article/le-belge-construit-toujours-plus-petit-en-20-ans-la-surface-des-maisons-neuves-a-diminue-de-25-m2-11169253>

World Economic Forum. (2022, juin 22). *What is the circular economy, and why does it matter that it's shrinking?* Consulté le juin 28, 2023, sur World Economic Forum:
<https://www.weforum.org/agenda/2022/06/what-is-the-circular-economy/>

Workshop

De Cooman, K. (2022, novembre 18). Earth discovery workshop. Bruxelles : BC materials.

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Présentation des pourcentages © représentation personnelle basée sur les chiffres cités dans le texte | 5 |
| Figure 2 : Organisation Walterre (asbl Walterre, 2022)..... | 7 |
| Figure 4 : La Grande Mosquée de Djenné © Paule Seux (Jean, 2021)..... | 11 |
| Figure 3 : Le palais de l'Alhambra (Escape Away, 2023) | 11 |
| Figure 5 : La nouvelle Orangerie à Lyon (Clément Vergély architectes, 2021) | 11 |
| Figure 6 : Maison dans la vallée de Cardona (Gauzin-Müller, 2018) | 12 |
| Figure 7 : La piscine municipale de Toro (Gauzin-Müller, 2018)..... | 12 |
| Figure 8 : Production de déchets aux divers stades de vie d'un bâtiment (Romnée & Vrijders, 2018) 15 | |
| Figure 9 : Economie circulaire (Union européenne, 2020) | 16 |
| Figure 10 : Cycle de vie des matériaux en terre crue (Schreckenbach, 2004) | 17 |
| Figure 11 : Bilan carbone et énergie grise de la terre crue avec des matériaux stabilisés ou cuits (Lkhamrichi, 2022)..... | 18 |
| Figure 12 : Les horizons du sol © Pauline Sémon (Gauzin-Müller, 2018)..... | 19 |
| Figure 13 : Composants de la terre (Van der Linden, s.d.) | 19 |
| Figure 14 : Roue des 12 méthodes constructives © CRAterre (Guillaud & Houben, 2006)..... | 22 |
| Figure 15 : Procédures de construction (Van der Linden, s.d.) | 23 |
| Figure 18 : Machine pour la fabrication des éléments en pisé © Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde 26 | |
| Figure 17 : Compactage du mélange de pisé introduit dans le coffrage © Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde | 26 |
| Figure 19 : Découpe du mur préfabriqué à la longueur de l'élément © Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde | 26 |
| Figure 16 : Usine de production de pisé préfabriqué © Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde..... | 26 |
| Figure 20 : Différents mélanges de « Kastar » © BC materials | 27 |
| Figure 21 : Différents mélanges de « Brusseleir » © BC materials | 27 |
| Figure 22 : Unité de production mobile © photo privée | 28 |
| Figure 23 : Préproduction des BTC © BC materials..... | 28 |
| Figure 24 : Murs construits en BTC © BC materials..... | 28 |
| Figure 25 : Briques de terre crue préfabriquées © BC materials..... | 28 |
| Figure 27 : Coulée d'une chape en terre crue © BC materials..... | 28 |
| Figure 26 : Véhicule et pompe à béton © BC materials..... | 28 |
| Figure 28 : Normes de construction en terre, traduit de (Ben-Alon L., Loftness, Harries, Hameen, & Bridges, 2020)..... | 29 |
| Figure 29 : École secondaire Païamboué, Koné, Nouvelle-Calédonie (Gauzin-Müller, 2018) | 30 |
| Figure 30 : Centre de méditation, Palo Alto, Californie, USA (Gauzin-Müller, 2018)..... | 30 |
| Figure 31 : Centre européen d'échantillonnage des sols, Orléans, France (Gauzin-Müller, 2018)..... | 30 |
| Figure 32 : Architecture historique en terre (Correia, Dipascuale, & Mecca, 2011)..... | 31 |
| Figure 33 : Grande Muraille de Chine © Getty Images..... | 32 |
| Figure 34 : Shibam, Yémen © George Steinmetz..... | 32 |
| Figure 35 : La grande Citadelle de Bam en Iran © Sacred Sites | 32 |
| Figure 36 : La maison espagnole © Anaïs Pereira | 33 |
| Figure 37 : Exemple bâtiment agricole © Anaïs Pereira | 34 |
| Figure 38 : Photos du projet à Edeghem © BC materials..... | 36 |
| Figure 39 : Le projet « Lot 8 » (Breschi, 2023)..... | 36 |
| Figure 40 : Mur en pisé (hé! architectuur, 2022) | 37 |
| Figure 41 : Élément de cuisine / enduit d' argile (hé! architectuur, 2022) | 37 |

| | |
|---|----|
| Figure 42 : Centre des visiteurs de la station ornithologique, Sempach, Suisse (Gauzin-Müller, 2018) | 38 |
| | |
| Figure 43 : Pose des éléments préfabriqués (Gauzin-Müller, 2018) | 38 |
| Figure 44 : L'intérieur du centre des visiteurs (Gauzin-Müller, 2018) | 39 |
| Figure 45 : Centre d'herbes Ricola, Laufen, Suisse (Gauzin-Müller, 2018) | 39 |
| Figure 46 : Pose des éléments préfabriqués (Gauzin-Müller, 2018) | 39 |
| Figure 48 : Retouche des joints entre les éléments préfabriqués (Gauzin-Müller, 2018) | 40 |
| Figure 47 : Séchage des éléments préfabriqués dans le hall de production (Gauzin-Müller, 2018) | 40 |
| Figure 49 : Maison de vacances Piazza Pintgia, Almens, Suisse (Gauzin-Müller, 2018) | 40 |
| Figure 50 : L'intérieur de la maison de vacances Piazza Pintgia (Gauzin-Müller, 2018) | 41 |
| Figure 51 : Posé d'un élément préfabriqué (Gauzin-Müller, 2018) | 41 |
| Figure 52 : L'intérieur des bureaux de l'imprimerie Gugler, Pielach, Autriche (Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2000) | 41 |
| Figure 53 : Pôle culturel à Cornebarrieu, France ((APM) Architecture & Associé, 2017) | 42 |
| Figure 54 : Restauration et transformation partielle du Grand Théâtre de Genève, Suisse (TERRAFIBRA, 2021) | 42 |
| Figure 55 : Musée d'archéologie, Dehlingen, France (nunc architectes, 2014) | 43 |
| Figure 56 : Détail technique de construction (nunc architectes, 2014) | 43 |
| Figure 57 : Un des projets avec un nouvel élément en terre crue (CRATERRE, 2023) | 44 |
| Figure 58 : Site du patrimoine mondial, Mohenjo-Daro, Pakistan (CRATERRE, 2023) | 45 |
| Figure 59 : Gestion des terres © BC materials | 46 |
| Figure 60 : Utilisation possible des déblais © BC materials | 46 |
| Figure 61 : Principaux types de sols © SPW - 2018 | 47 |
| Figure 62 : Exemple de la carte du BDES, Liège centre-ville © BDES | 49 |
| Figure 63 : Premier cas, maison sans cave © illustration personnelle | 51 |
| Figure 64 : Deuxième cas, maison avec cave © illustration personnelle | 52 |
| Figure 65 : Comparaison des deux cas © illustration personnelle | 53 |
| Figure 66 : Processus © Cycle Terre | 54 |
| Figure 67 : Centre d'Enfouissement Technique en Wallonie © SPW | 56 |
| Figure 68 : Premier cas, nouvelles habitations © illustration personnelle | 59 |
| Figure 69 : Deuxième cas, rénovations © illustration personnelle | 59 |
| Figure 70 : Troisième cas, habitations et rénovations © illustration personnelle | 60 |
| Figure 71 : Production sur chantier, maison sans cave © illustration personnelle | 61 |
| Figure 72 : Préproduction © illustration personnelle | 61 |
| Figure 73 : Production sur chantier, maison avec cave © illustration personnelle | 62 |
| Figure 74 : Préproduction pour rénovations © illustration personnelle | 62 |
| Figure 75 : Préproduction rénovations © illustration personnelle | 62 |
| Figure 76 : Utilisation du sol © Iweps | 64 |