

Guide général : Construire durablement avec Léém



© Alexander D'Hiet

Introduction

Pendant des millénaires, l'humanité a construit avec ce qui était proche, à portée de main, sain, facile et abondant : de la terre. En façonnant de la terre crue en sols et murs, les gens étaient capables de créer un abri, une maison chaleureuse pour leur famille et leurs proches. Au fil du temps, et à la fin du XIVe siècle, nous avons découvert les avantages de l'énergie fossile pour transformer l'argile non cuite en briques cuites à l'échelle industrielle et pour cuire certains minéraux afin d'obtenir du ciment . Mais aujourd'hui, l'utilisation intensive d'énergie fossile crée de nombreux dangers car elle réchauffe notre climat, elle pollue nos airs, elle épuise nos ressources.

Nous pensons qu'en revenant à la terre crue et en l'améliorant avec des infrastructures de production de pointe, nous pouvons réduire l'énorme empreinte carbone du secteur des matériaux de construction, valoriser les matériaux abondants localement (considérés comme déchets) et améliorer la qualité de vie de nombreuses personnes.

Sommaire

Introduction	3
1. Un guide général de Léém	7
1.1 Qui sommes nous et qu'est-ce que «Léém» ?	8
1.2 Un guide général ...	8
1.3 ... à utiliser avec les Guides et Fiches Techniques de Léém	10
2. Durabilité et circularité	13
2.1 Durabilité environnementale	17
2.1.1 Un processus de production très faible en CO2	17
2.1.2 Des matériaux doublements circulaires	18
2.1.3 Sourcing local avec un minimum de transport	21
2.1.4 Épuisement des espaces	22
2.1.5 Consommation d'eau	23
2.1.6 Impact sur le cycle de vie et Déclaration Environnementale Produit.	24
2.2 Durabilité du bâtiment et climat intérieur	25
2.2.1 Un climat intérieur sain	25
2.2.2 Émissions de COV	26
2.2.3 Confort Hydrique	27
2.2.4 Confort thermique	32
2.2.5 Etanchéité à l'air	34
2.2.6 Sécurité incendie	36
2.2.7 Confort acoustique	38
2.2.8 Durée de vie prolongée	40
2.2.9 Pas d'expositions aux radiations (Radon)	42
2.2.10 Blindage contre les rayonnements électromagnétiques à haute fréquence	42

3. Conseils de fin de vie	45
3.1 Cadre légal	48
3.2 Démolition	49
3.3 Conditions pour le recyclage des matériaux de la gamme Léém	50
3.4 Scénarios de fin de vie pour les matériaux de la gamme Léém	52
3.5 Programme de Reprise de Léém	54
3.6 Les bénéfices de l'ACV	55

4. Références	59
----------------------	-----------

5. Remerciements et crédits	63
------------------------------------	-----------

1. Un guide général de Léém



© Joseph Halligan

1.1 Qui sommes nous et qu'est-ce que «Léém» ?

BC materials est une société coopérative bruxelloise qui transforme les terres excavées en matériaux de construction circulaires, tels que des enduits, des blocs et du pisé. BC materials a fondé la gamme des matériaux en terre crue « Léém » en collaboration avec des partenaires industriels belges, à la fois des fournisseurs et des gestionnaires de déchets tels que ABR/De Meuter, Nonet, AC materials, et des producteurs industriels tels que Beton Claesen et Vande Moortel/Brickz. En développant et en industrialisant l'approche de la réutilisation des « déchets », nous pouvons à la fois réduire les énormes quantités de déchets (37 millions de tonnes de terre excavée en Belgique chaque année) et, en même temps, réduire la lourde empreinte carbone du secteur des matériaux de construction (10 % de toutes les émissions de CO2 dans le monde).

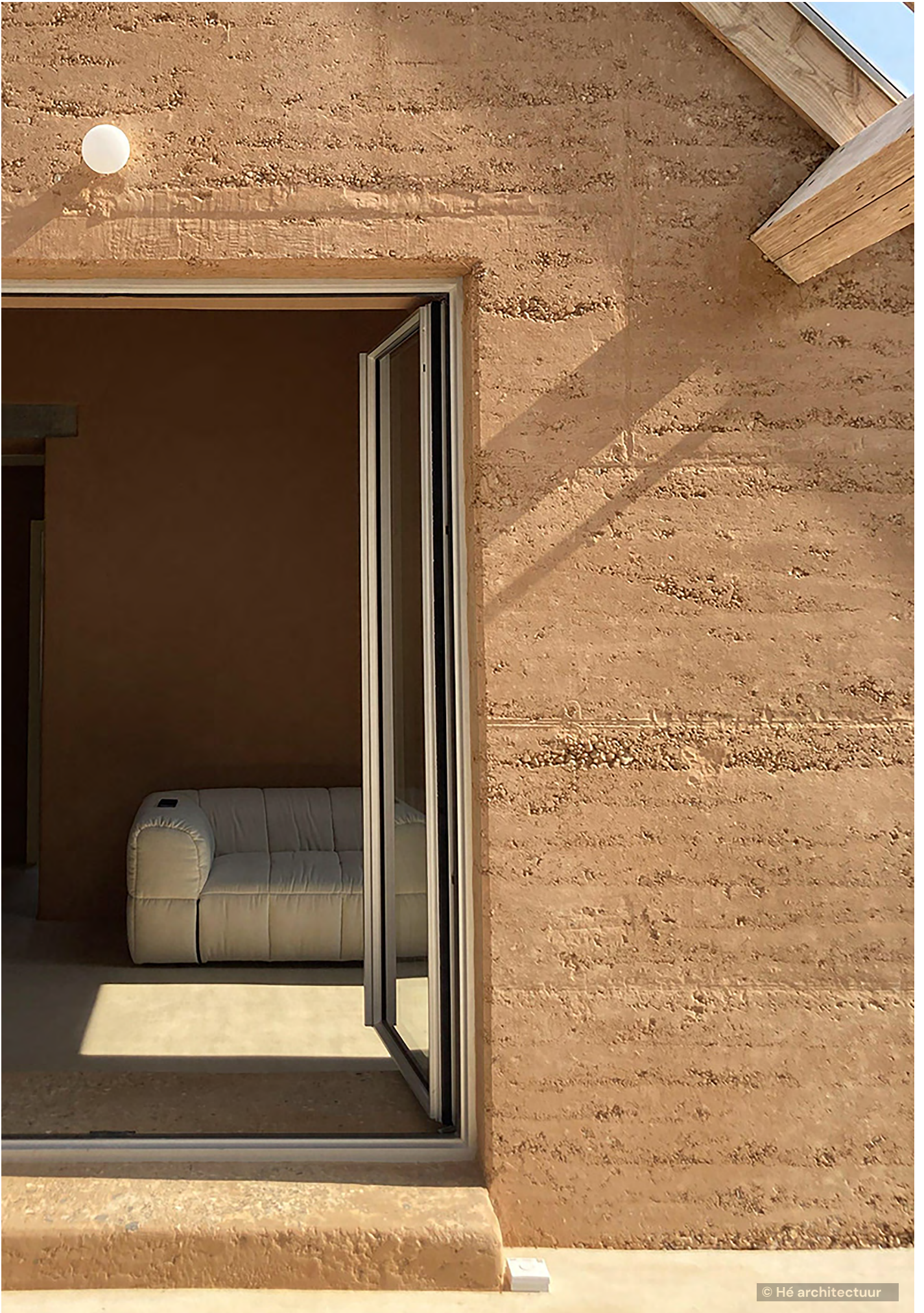
En s'associant avec différents partenaires aux qualités complémentaires, Léém offre un ensemble de solutions de construction, combinant les savoirs anciens et les techniques actuelles afin de proposer un standard pour le secteur de la construction, faisant de la construction en terre une alternative résolument moderne.

1.2 Un guide général ...

Ce Guide Général de Léém a pour but de fournir des informations claires et fiables aux professionnels de la construction (architectes, ingénieurs, entrepreneurs) sur les matériaux de la gamme Léém et leurs caractéristiques. A ce titre, nous –les auteurs de la coopérative BC materials – avons choisi de « se tenir sur les épaules des géants » : les connaissances et les directives qui sont mentionnées proviennent d'ouvrages de référence de deux des réseaux de construction en terre les plus expérimentés : le réseau français et le réseau allemand. Le réseau français s'articule autour de l'institut de recherche universitaire CRAterre, et s'étend vers des organismes tels que Cycle-terre, Amaco, ENTPE, CSTB. Le réseau allemand s'articule autour du Dachverband Lehm, avec des experts tels que le Dr Horst Schröder, le Dr Christof Ziegert, et des réglementations nationales telles que les normes DIN et le cadre EPD.

Ce Guide Général de Léém est donc une compilation des publications de recherches les plus récentes, des agréments techniques et des normes en Allemagne et en France les plus récentes, mis à jour avec des recherches supplémentaires et l'expérience de BC materials dans le contexte du Benelux. Nous avons essayé de montrer autant que possible à partir de quelles références nous avons compilé certaines informations spécifiques, en mentionnant la référence dans la colonne latérale du texte, et en ajoutant la bibliographie complète dans la section 4. Les personnes que nous tenons particulièrement à remercier pour leurs contributions sont mentionnées dans la section «Remerciements» à la fin de ce guide.

Rédigé dans un esprit de partage de l'expertise européenne en matière de construction en terre crue, nous espérons que ce guide vous sera utile et qu'il contribuera au développement du secteur de la construction en terre crue dans le Benelux.



© Hé architectuur

1.3 ... à utiliser avec les Guides et Fiches Techniques de Léém

Outre ce Guide Général, nous proposons également des Guides Techniques spécifiques sur l'application des Enduits et Peintures à l'Argile de Léém, des Blocs de Terre de Léém et du Pisé de Léém, ainsi que des Fiches Techniques par produit, tous téléchargeables sur le site leem.works. Le Guide Général, les Guides Techniques et les Fiches Techniques peuvent être lus en parallèle :

- Ce Guide Général établit un lien entre les principes de durabilité et certains paramètres relatifs aux propriétés physiques. Lors de l'énumération des propriétés physiques sur les fiches techniques, la signification d'un paramètre pour une propriété physique donnée n'est pas toujours évidente. Par exemple, sur la fiche technique de l'Enduit d'Argile de Léém, on peut trouver l'indice de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ : qu'est-ce que cela signifie ? Ce Guide Général explique ce paramètre à la section 2.2.3.
- Ces paramètres liés aux propriétés physiques spécifiques des matériaux de Léém sont mis en évidence dans un encadré tout au long de ce Guide Général. Ils sont ainsi facilement repérables.
- Pour chaque principe de durabilité dans les sections 2 et 3, nous mettons en évidence dans un texte d'une ligne l'avantage respectif des matériaux de Léém. Cela permet de comprendre rapidement ce que les matériaux de Léém apportent comme avantage. Cet avantage est ensuite expliqué scientifiquement pour que tout le monde puisse le comprendre et, finalement, en être convaincu.



2.

Durabilité et circularité



Dans le rapport de Brundtland présenté à la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement des Nations Unies intitulé «Notre avenir à tous/ Our Common Future» (1987), le terme «durabilité» a été utilisé pour la première fois pour décrire un développement durable de l'humanité. Le développement durable garantit qu'il «répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins». Le terme «développement durable» comprend trois aspects qui doivent être considérés comme égaux sur une période appropriée :

- Écologie
- Economie
- Demandes des utilisateurs (préoccupations socioculturelles / qualité fonctionnelle)

Le cadre des Objectifs de Développement Durable (ODD) établi par les Nations unies en 2015 s'appuie sur le concept de développement durable en fournissant un ensemble d'objectifs spécifiques et mesurables que les pays et les autres parties prenantes veulent atteindre pour parvenir à un avenir durable. L'ensemble des 191 pays du monde se sont engagés à les atteindre. Les ODD sont un ensemble de 17 objectifs établis comme un appel universel à l'action pour mettre fin à la pauvreté, protéger la planète et faire en sorte que tous les peuples jouissent de la paix et de la prospérité d'ici 2030. Le Conseil Mondial du Bâtiment Durable (« World Green Building Council ») a appliqué ces ODD au secteur de la construction. Aujourd'hui, les matériaux de la gamme Léém contribuent activement à la réalisation de 9 ODD, comme le montre l'image ci-dessous.



[30] Principes et aspects importants pour le choix de matériaux de construction durables

En quoi la construction en terre est une technique durable à plus d'un titre.

La section 2.1 se concentre sur les principes de durabilité environnementale des matériaux de la gamme Léém. Ces principes sont détaillés dans les sections 2.1.1 à 2.1.6. Pour chacun de ces thèmes, un paramètre quantifiable est proposé, qui est également pertinent dans le contexte d'une analyse du cycle de vie.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode permettant de calculer l'impact environnemental d'un produit tout au long de son cycle de vie, sur la base d'un inventaire des intrants (matières premières, ressources énergétiques, etc.) et des extrants (émissions dans l'air, l'eau et le sol). Les résultats de l'ACV sont exprimés suivant divers indicateurs reflétant la contribution potentielle à divers impacts environnementaux, tels que le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources naturelles ou l'appauvrissement de la couche d'ozone. En option, ces indicateurs (nombre actuel en Europe : 13) sont pondérés et combinés en score unique exprimé en «millipoints». Les principes généraux d'une ACV sont décrits dans les normes internationales ISO 14040 et 14044. En outre, l'industrie européenne de la construction dispose également de normes spécifiques : EN 15804 pour les produits et matériaux et EN 15978 à l'échelle du bâtiment. [30] Dans ce Guide Général des matériaux de la gamme Léém, nous nous concentrons uniquement au niveau produit (qui sert ensuite aux calculs au niveau du bâtiment). Cette analyse du cycle de vie des matériaux de construction prend en compte les phases suivantes du cycle de vie : production, construction, utilisation et fin de vie. Ces phases sont également divisées en modules.

— Étape du produit (module A1-A3) : Cette étape comprend l'extraction,

Étape de production			Ét. de Construction		Étape d'utilisation					Étape de fin de vie				A / C *
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
l'approvisionnement en matières premières	Transport	Fabrication	Transport	Construction/Installation	Utilisation	Entretien	Réparation	Remplacement	Réhabilitation	Déconstruction/Démolition	Transport	Traitement des déchets	Élimination des déchets	potentiel de réutilisation, récupération, recyclage
Modules qualifiés dans le cadre de l'ACV du projet DVL [1], ou des matériaux de terre crue ont des caractéristiques spéciales.					B6 Besoin en énergie en phase d'exploitation					*Avantages / charges				
					B7 Besoin en eau en phase d'exploitation									

Schéma d'équilibre pour les phases du cycle de vie de l'UPD conformément à la norme DINEN 15804

- le transport et la transformation des matières premières en produits de construction.
- Étape de la construction (module A4-A5) : Cette étape comprend le transport et la livraison des produits de construction depuis le fabricant jusqu'au site de construction, et l'installation qui s'ensuit.
 - Étape d'utilisation (module B1-B7) : Cette étape comprend l'utilisation et l'entretien du produit de construction pendant sa durée de vie prévue, y compris les rénovations et les remplacements.
 - Étape de fin de vie (module C1-C4) : Cette étape comprend la fin de vie du produit de construction, y compris la démolition ou la déconstruction du produit de construction et l'élimination des matériaux de construction.
 - Avantages et charges hors limites (module D) : avantages ou charges environnementaux ou sociaux générés en dehors des limites du système du produit de construction évalué, mais qui peuvent être attribués au produit de construction, tels que la réutilisation, ...

Une valeur ACV en millipoints peut donc être considérée comme le résumé quantifié de l'impact environnemental, et donc des principes de durabilité d'un matériau de construction. Pour permettre à la Commission européenne de remplir son «Green Deal» (2019-2050 : décarbonisation nette complète de l'Union européenne), l'analyse du cycle de vie est recommandée comme outil scientifique précieux.

La section 2.2 se concentre sur les principes de durabilité des matériaux de construction Léém en ce qui concerne l'utilisation du bâtiment et le climat intérieur. Ces principes sont expliqués dans les sections 2.2.1 à 2.2.9. Pour chacun de ces thèmes, un paramètre quantifiable est présenté. Ces paramètres renseignent sur les propriétés physiques spécifiques d'un matériau de construction en rapport avec la durabilité. Pour les matériaux de Léém, ces valeurs peuvent être trouvées dans les propriétés physiques énumérées dans les fiches techniques téléchargeables sur le site web leem.works.

2.1 Durabilité environnementale

2.1.1 Un processus de production très faible en CO2

Produire des matériaux de construction en terre ne génère qu'une quantité minimale de gaz à effet de serre : tous les processus – séchage, tamisage, concassage, prémélange, mélange, compactage, moulage, palettisation – sont électrifiés et n'utilisent pas de combustibles fossiles pour cuire des matériaux ou faire fonctionner les machines.

Les matériaux de la gamme Léém émettent une quantité très faible de gaz à effet de serre : ils ne sont pas cuits et le processus de production ne nécessite pas de combustibles fossiles.

Les installations de BC materials sont alimentées par de l'électricité provenant de panneaux solaires, ainsi qu'un contrat d'électricité d'origine renouvelable. Toutefois, certains additifs tels que le ciment dans les Blocs Compressés de Léém ou la cellulose dans le Mortier Colle de Léém ou Finish de Léém ont été produits par des partenaires à l'aide de combustibles fossiles. La proportion de ces additifs est contrôlé soigneusement dans les matériaux de la gamme Léém.

Paramètre: Les émissions de carbone et d'autres gaz à effet de serre sont exprimées via l'indicateur «Potentiel de réchauffement global - fossile» dans une Analyse du Cycle de Vie (ACV) selon la norme EN15804 (Voir également Section 2.1.6) en mesurant les tonnes équivalentes de CO2 émises par unité de chacun des matériaux de la gamme Léém.



2.1.2 Des matériaux doublements circulaires

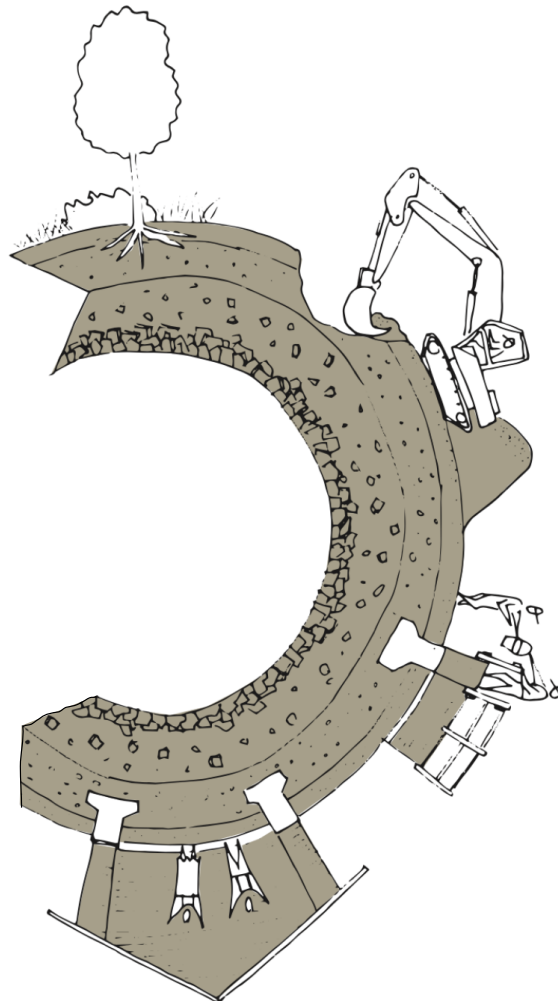
Les matériaux de la gamme Léém sont doublement circulaires : depuis leur origine jusqu'à leur fin de vie.

Circulaire depuis l'origine :

BC materials utilise des ressources secondaires : des ressources géologiques non polluées et non perturbées extraites de sites de construction urbains. Ces terres excavées et ces ressources urbaines sont considérées comme des déchets une fois qu'elles quittent le chantier de construction.

Les matériaux de Léém sont circulaires depuis leur origine : nous nous approvisionnons en matières secondaires sur les chantiers de construction, légalement considérées comme des déchets.

En Belgique, 37 millions de tonnes de terre sont excavées chaque année sur les chantiers de construction, dont 16 millions de tonnes sont inutilisées et jetées dans des décharges ou des carrières, ce qui implique tous les problèmes d'utilisation des terres, de transport, etc. En plus de ces terres excavées, la Belgique produit chaque année environ 22 millions de tonnes de déchets minéraux de construction, dont 90 à 95% sont aujourd'hui principalement recyclés en agrégats de faible qualité pour les travaux d'infrastructure souterrains.



Circulaire en fin de vie :

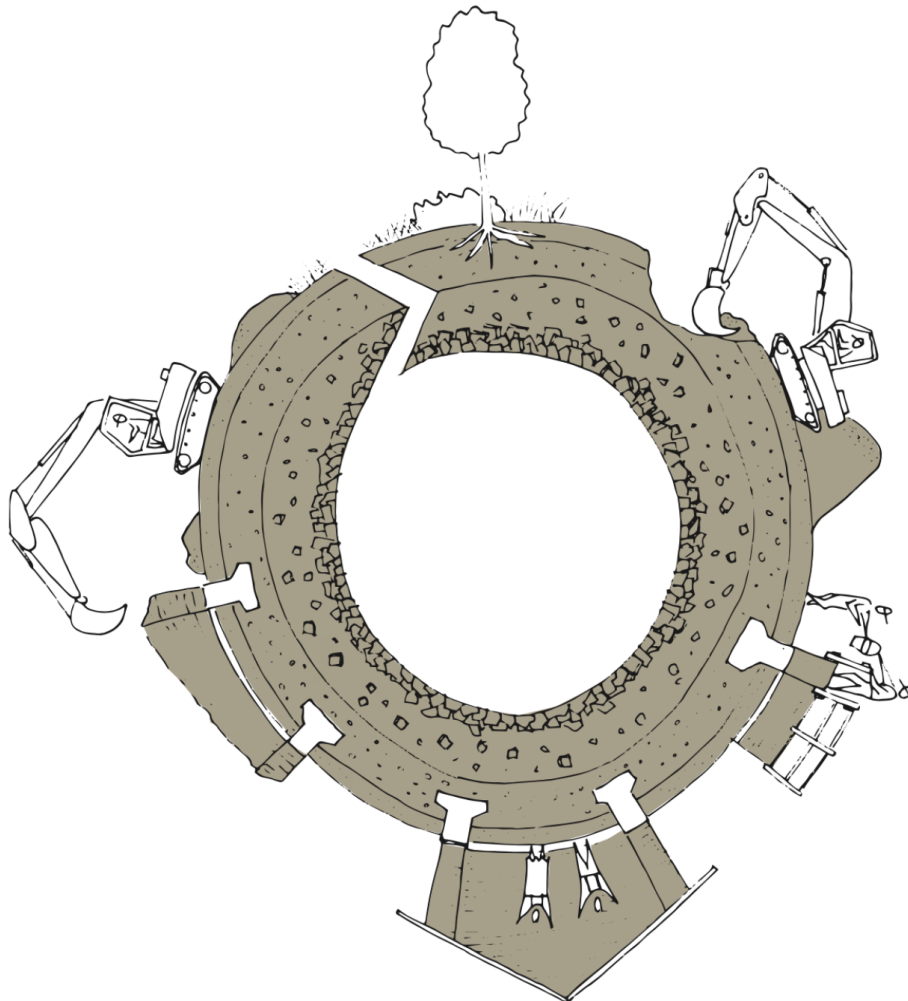
Les matériaux de la gamme Léém utilisent l'argile comme liant. Les forces de liaison de l'argile ne nécessitent pas d'altération chimique du matériau et sont donc réversibles. En ajoutant de l'eau, le matériau de construction redevient de la terre.

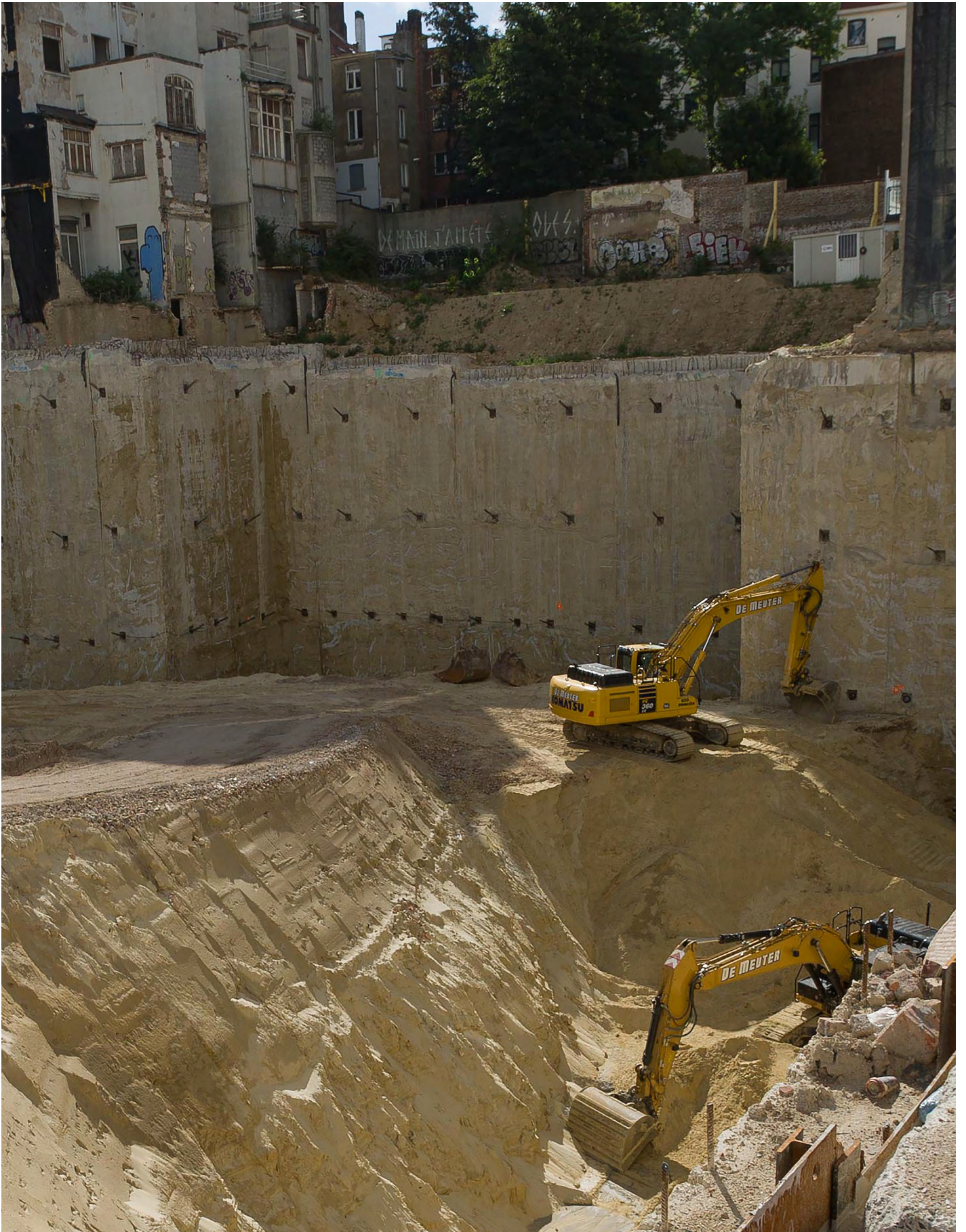
Les matériaux de Léém sont également circulaires en fin de vie : ils sont réutilisables ou recyclables à l'infini sans perte de qualité et de performance.

Cela permet d'excellentes qualités de réparation et de réutilisation des matériaux de Léém. Typiquement, la construction en terre utilise la couche molle de la terre (appelée «horizon B», «sol» ou «roche meuble») pour créer des matériaux destinées à l'utilisation humaine. Après la fin du cycle de vie d'un bâtiment, les matériaux de Léém peuvent retourner à la terre (zéro déchet), ou être remodelés en matériaux de Léém (réemploi).

Paramètre : La double circularité des matériaux de la gamme Léém se traduit par une réduction d'impact environnemental 2 deux manières :

- A l'origine, cela évite l'extraction de ressources primaires de l'environnement, ce qui réduit le score d'Impact Environnemental de l'ACV au niveau du module A1 et autres (voir également Section 1.1.6).
- En fin de vie, cela évite la production des déchets et les impacts associés et permet de générer des bénéfices au niveau du module D.





[25] The hidden cost of transportation of construction materials: An overview, Journal of Engineering Design and Technology

2.1.3 Sourcing local avec un minimum de transport

Au lieu de transporter des déchets minéraux provenant de chantiers de construction éloignés, et de faire venir en même temps des ressources primaires de carrières lointaines, BC materials s'approvisionne sur des chantiers locaux évitant le transport des déchets et ressources et leurs impacts environnementaux associés.

Les matériaux de Léém sont locaux : nous nous approvisionnons sur des chantiers proches et nous livrons en circuits courts.

Comme les produits de construction en terre n'ont pas de processus de cuisson dans leur production, le seul moment où les combustibles fossiles sont utilisés est le transport des ressources et des produits. La réduction de ces transports, en quantité et en distance, est au cœur de notre modèle d'approvisionnement et de production circulaire. Bien entendu, cela présente également des avantages économiques, car les coûts de transport représentent environ 39 % à 58 % des coûts logistiques totaux d'un chantier de construction et entre 4 % et 10 % du prix de vente du bâtiment [25]. Nous livrons dans un rayon de 250 kilomètres, car au-delà, l'impact environnemental du transport devient trop important.

Paramètre : Un approvisionnement local permet d'éviter le transport de ressources lourdes et de matériaux de construction, ce qui réduit l'Impact Environnemental sur le cycle de vie à 3 niveaux: modules A2 (ressources), A4 (construction) et C2 (fin de vie).



[26] Diagnosis of the State of the Territory in Flanders
[27] Beleidsplan Ruimte Vlaanderen
[28] Schéma de développement du territoire (SDT),

2.1.4 Épuisement des espaces

La Belgique a le score le plus élevé pour les indicateurs d'étalement urbain et, dans le contexte européen, la quasi-totalité de la zone est considérée comme urbaine [26]. Par conséquent, l'espace est rare et le gouvernement flamand a pour objectif de légiférer sur une consommation nette nulle de nouveaux espaces d'ici 2040, en commençant dès aujourd'hui par des limites progressives sur la consommation de nouveaux espaces [27], et le gouvernement Wallon d'ici 2050 [28]. Dans cette perspective, BC materials estime qu'il est préférable d'utiliser au maximum des infrastructures existantes, des centres de tri des flux de déchets existants et des installations logistiques existantes plutôt que d'occuper de nouveaux espaces ou de devoir puiser des matières premières dans des carrières. Cela a un effet de substitution sur de nombreux matériaux de construction, c'est pourquoi notre approche avec la gamme Léém est d'éviter toute nouvelles installations et d'utiliser les infrastructures des matériaux de construction existant.

Les matériaux de Léém sont fabriqués dans des infrastructures déjà existantes : pas nécessaire d'occuper de l'espace précieux pour construire de nouvelles usines ou carrières.

Cela permet d'éviter l'occupation de nouveaux espaces, et a évidemment un impact positif sur la résilience des écosystèmes, la conservation des habitats et des espèces, car nos matériaux et nos modes de production ne nécessitent pas de décharges, de nouvelles ressources, de nouvelles carrières ou de nouveaux espaces à artificialiser.



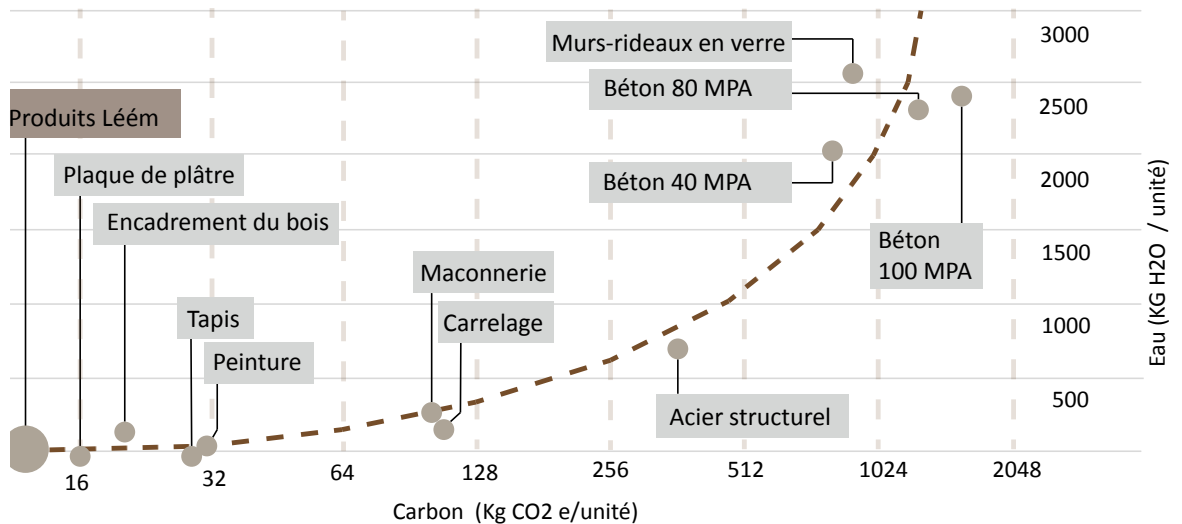
[29] Embodied water' is the latest challenge for the building industry

2.1.5 Consommation d'eau

Outre l'utilisation très importante de matières premières minérales, le secteur de la construction a également une forte consommation d'eau. Aujourd'hui, 38 % de la consommation d'eau sur le cycle de vie d'un bâtiment a lieu avant même que quelqu'un n'ouvre un robinet dans un bâtiment achevé [29]. De grandes quantités d'eau douce sont utilisées pour la production de béton, d'acier et de verre, comme le montre le graphique ci-dessous.

Les matériaux de la gamme Léém ne nécessitent qu'une faible quantité d'eau, contrairement aux matériaux de construction classiques. Toute l'eau est restituée au cycle de l'eau lors du processus de séchage.

Les matériaux de la gamme Léém, quant à eux, sont partiellement produits à partir d'eau de pluie récupérée et la plupart d'entre eux ne nécessitent que très peu d'eau. En outre, l'essentiel de l'eau de production s'évapore et retourne dans le cycle de l'eau lors du séchage à l'air.



SOURCE: SLATTERY

L'eau et le carbone dans les matériaux de construction

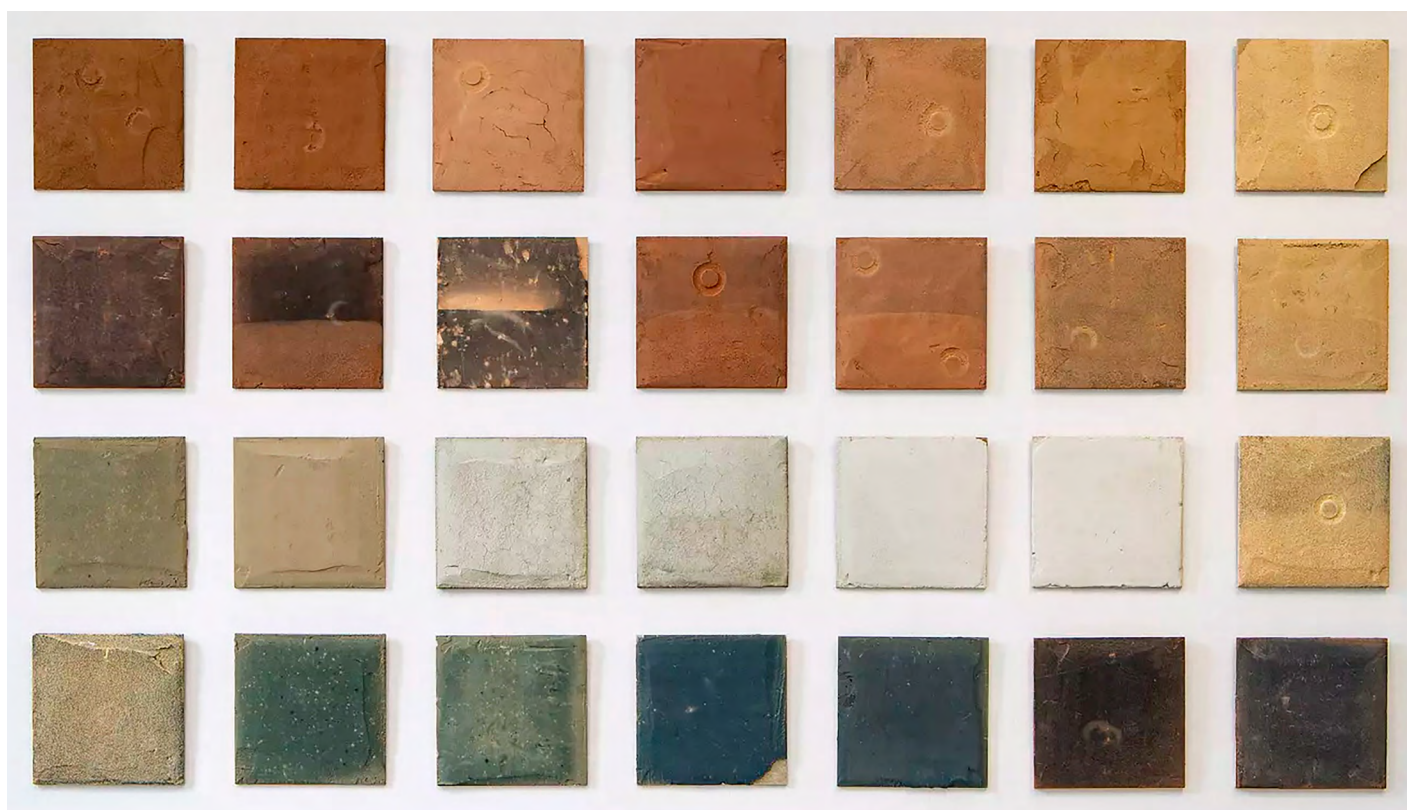
2.1.6 Impact sur le cycle de vie et Déclaration Environnementale Produit.

A l'issue de l'Analyse de Cycle de Vie ou ACV – cf. section 2 pour plus de détails – d'un matériau de construction, les résultats peuvent être déclarés sous forme de Déclaration Environnementale Produit (DEP) qui peut être utilisée dans un logiciel pour calculer l'ACV d'un bâtiment. En Belgique, ce logiciel s'appelle «TOTEM» (totem-building.be). Sur le site web de TOTEM, on peut lire de manière détaillée les principes de l'ACV des matériaux de construction et des bâtiments.

Les matériaux de Léém ont un impact environnemental 10 à 20 fois meilleur que la plupart des matériaux de construction courants.

BC materials a réalisé les ACV spécifiques de l'ensemble des matériaux de la gamme Léém. En raison de leur très faibles émissions de gaz à effets de serre, de leur circularité et de l'approche en circuits courts, les matériaux de la gamme Léém ont un impact environnemental plusieurs fois moins important que des matériaux cuits, du béton ou d'autres matériaux à forte intensité de combustibles fossiles. Les valeurs spécifiques pour les différents matériaux de la gamme Léém sont déclarées dans les fiches techniques et les Guides Techniques respectifs.

Paramètre : 2 indicateurs d'impact environnemental sont généralement déclarés: Potentiel d'échauffement global - Fossile et le score unique (singel score) d'Impact Environnemental global sur le cycle de vie.



2.2 Durabilité du bâtiment et climat intérieur

2.2.1 Un climat intérieur sain

[10] Sustainable Building with Earth.

La qualité de l'air intérieur est en moyenne de 2,5 à 5 fois plus mauvaise que l'air extérieur (Flemish government & VITO, 2010), alors que nous passons 90% de notre temps à l'intérieur (European Environment Agency, 2022). Cette mauvaise qualité de l'air intérieur est principalement causée par les émissions de Composés Organiques Volatiles (COV) des matériaux de construction, que ce soient les revêtements de sol, les cloisons et les meubles, les murs et les revêtements muraux, les matériaux d'isolation, les peintures, les vernis, les mastics et les adhésifs, les pare-vapeurs, les produits de préservation du bois, les installations techniques et les matériaux contenant des agrégats et des additifs. [10] (p.415)

Les matériaux de la gamme Léém utilisent des matières naturelles, minérales et non polluées pour un environnement intérieur sain.

Toutes nos ressources en terre excavée se révèlent exemptes d'émissions des substances nocives (voyez aussi section 2.2.2). En outre, ils sont exemptes de pollution, à la suite de tests continus effectués conformément à l'OVAM Vlarebo (Région flamande) et aux Normes d'intervention (Région bruxelloise), avec des tests supplémentaires pour les PCB et l'amiante. Au total, 51 paramètres de pollution sont testés, tels que les métaux lourds, les hydrocarbures, les huiles minérales, les composés inorganiques, les COV, les PCB et l'amiante. Ces paramètres sont testés deux fois, une fois lors de l'excavation et une fois lors de la transformation en matériaux de construction. De cette façon, BC materials s'assure de l'innocuité des ressources géologiques entrant dans la composition des matériaux de la gamme Léém. Ces terres formées naturellement sont considérées comme exemptes de substances nocives et sont «recommandées sur la base des principes de la biologie de la construction». [10] (p.415)

Par ailleurs, soulignons les propriétés de fixation des cations des particules d'argile dans les matériaux de construction en terre : les surfaces des éléments de construction en terre avec des pores ouverts ont une capacité d'adsorption élevée pour les particules externes toxiques et non toxiques, ou pouvant être responsable d'odeurs. Les matériaux de construction en terre intègrent les composés dans leur structure minérale argileuse, ce qui les neutralise et/ou rend les odeurs imperceptibles. [10] (p.518)

2.2.2 Émissions de COV

En plus de la non-pollution des ressources, nous effectuons des essais d'émission de COV sur les produits finis. Les COV (comme le formaldéhyde ou le benzène) comprennent une variété de substances chimiques, dont certains peuvent avoir des effets néfastes à court ou long terme. Les concentrations de nombreux COV sont généralement nettement plus élevées à l'intérieur (jusqu'à cinq fois plus élevées, voyez section 2.2.1) qu'à l'extérieur. Les matériaux de construction de la gamme Léém émettent des niveaux indétectables de COV et contribuent donc à un air intérieur sain.

Les matériaux de la gamme Léém favorisent un climat intérieur sain : ils améliorent la qualité de l'air et sont exempts de COV.

Paramètres: Les émissions totales de COV sont mesurées en microgrammes par mètre cube d'air. Les émissions sont considérées comme nulles si elles sont inférieures aux valeurs seuils, ce qui est le cas pour l'ensemble des matériaux de la gamme Léém.



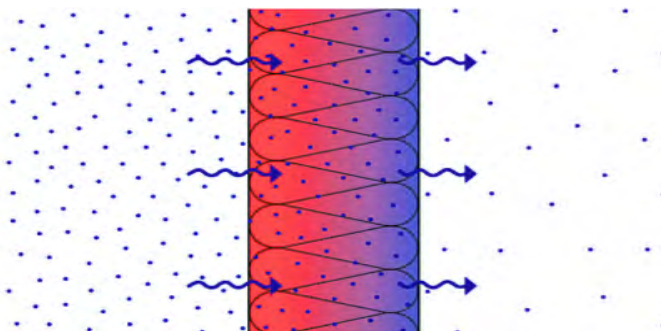
2.2.3 Confort Hydrique

En cuisinant, en se douchant et en faisant le ménage, une famille ajoute en moyenne 10 litres d'humidité à l'air intérieur chaque jour. Environ 10 à 50 % de tous les bâtiments souffrent aujourd'hui d'un excès d'humidité. Les personnes vivant dans des maisons humides sont 40 % plus susceptibles de développer de l'asthme et d'autres maladies respiratoires. De même, les virus, tels que COVID-19, se propagent d'avantage dans des environnements trop humides ou trop secs (MIT, 2022).

Les niveaux d'humidité intérieure sont idéals entre 40 et 60 % d'humidité relative. Nous décrivons ci-dessous plusieurs façons dont les matériaux de la gamme Léem peuvent contribuer à améliorer le confort hydrique intérieur.

a. Régulation de l'humidité intérieur

L'humidité peut pénétrer dans un élément de construction en terre sous forme de liquide ou de gaz en raison des propriétés hygroscopiques du matériau et de sa structure poreuse ouverte. En fonction des différences d'humidité, de température et de pression de vapeur entre l'élément de construction et le milieu adjacent, l'humidité peut être transportée à travers l'élément de construction, y être stockée et être à nouveau libérée. L'élément de construction en terre et son environnement immédiat évoluent constamment vers un équilibre hygroscopique. C'est ce que l'on appelle le principe du mur «respirant».



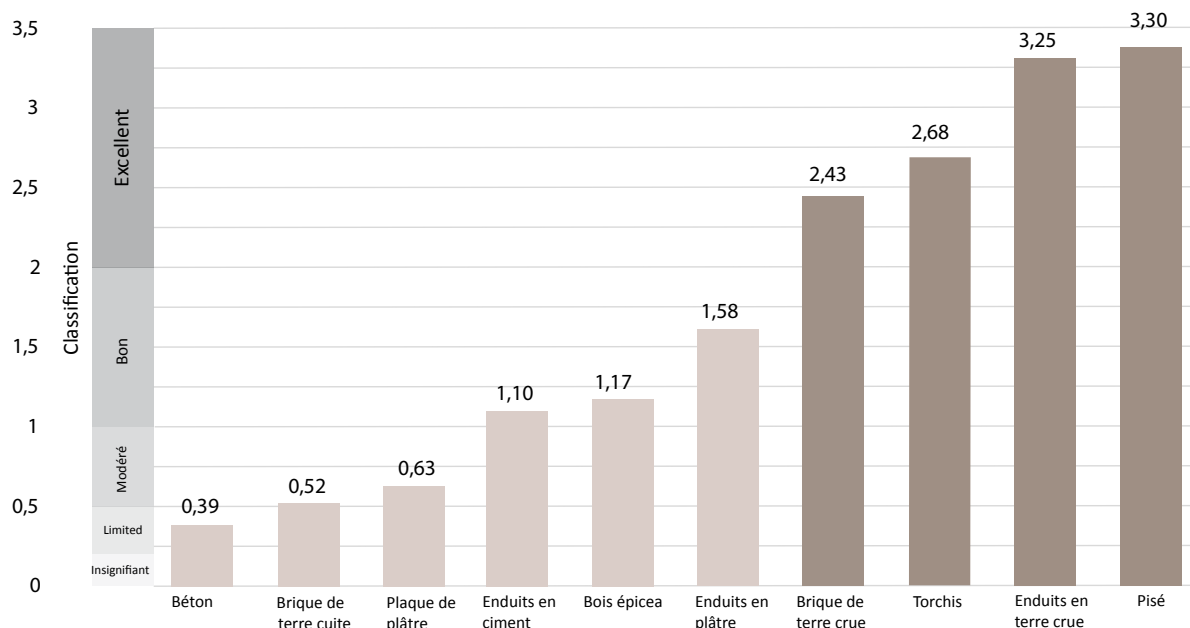
Assemblage d'un mur montrant un conducteur de vapeur vers l'extérieur pour un climat froid

«Respirer» signifie que la vapeur d'eau («humidité de l'air») se diffuse à travers le matériau de construction poreux. Cette propriété est indiquée par le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ . La valeur μ est un rapport sans unité qui compare la densité de diffusion du flux de vapeur d'eau dans un matériau de construction avec celle trouvée dans une couche d'air d'une épaisseur équivalente sd . L'air immobile a une valeur μ de 1. La valeur sd indique l'épaisseur nécessaire de la couche d'air pour avoir la même résistance à la diffusion que le matériau de construction spécifié avec une épaisseur de couche d . Cela permet de comparer des couches d'éléments de construction d'épaisseurs différentes :

$$sd = \mu \times d$$

Un μ faible indique que le matériau de construction transporte facilement l'humidité.

Les Valeurs Tampons d'Humidité sont une autre mesure permettant de définir la capacité d'un matériau de construction à réguler l'humidité. En général, la valeur tampon d'humidité est inversement proportionnelle à l'indice de résistance à la vapeur d'eau : une VTH élevée est liée à un μ faible.



Comparaison de la capacité de régulation de l'humidité des matériaux en terre

[7] Guide de conception et de construction.
 [9] Earth Masonry: Design and Construction Guidelines.
 [10] Sustainable Building with Earth.

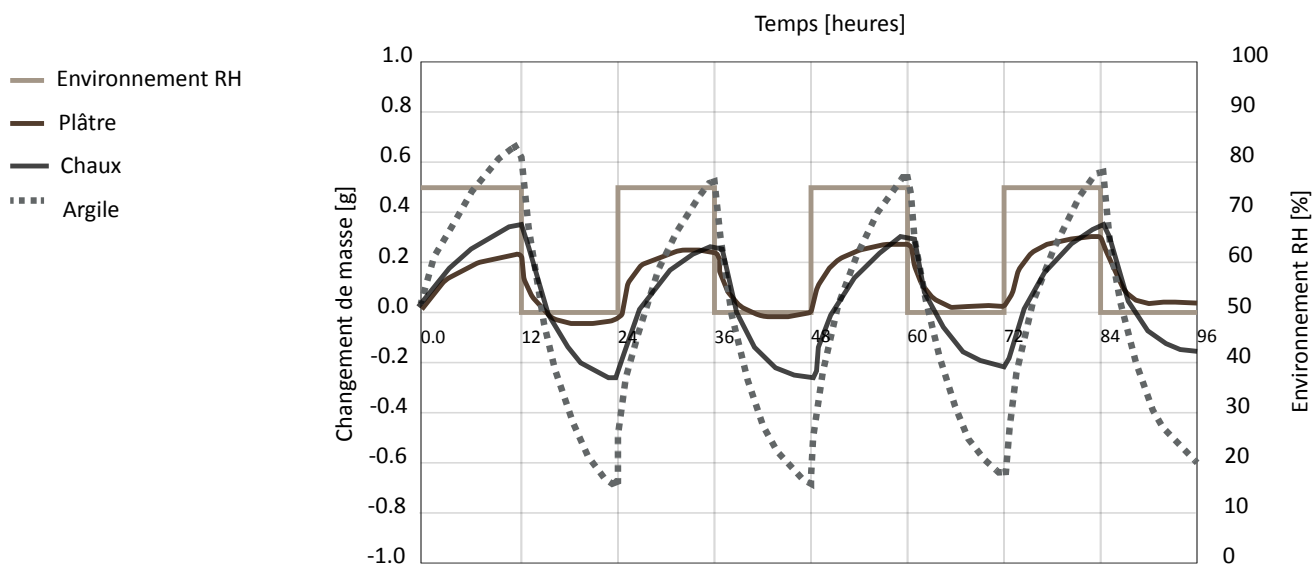
Les matériaux de Léém ont des facteurs de résistance à la vapeur d'eau faibles, compris entre 5 et 10, et des Valeurs Tampons d'Humidité élevées, comprises entre 2,2 et 3. Cela a deux effets bénéfiques :

- La régulation de l'humidité à court-terme : à travers sa surface (10-15 premiers mm) le matériau en terre crue peut rapidement absorber l'humidité excédentaire et ainsi atténuer les fluctuations immédiates de l'humidité relative (p.ex. dans les salles de bain) [9] (p.74-75)
- La régulation de l'humidité à long-terme : à travers son épaisseur, le matériau en terre crue est capable de réguler l'humidité entre les espaces des deux côtés du mur. Plus le mur est épais, plus la quantité d'humidité pouvant être absorbée et la période durant laquelle cet effet régulateur peut être observé sont importantes. [9] (p.74-75) Le renouvellement d'air peut ainsi être limité aux autres besoins sanitaires tels que l'évacuation du dioxyde de carbone. Cette propriété de la terre limite les risques de condensation et de moisissures." [7] (p.78-79)

Des recherches de Minke et Holl/Ziegert [10] (p.408) montrent que les matériaux de construction en terre ont une performance considérablement meilleure que les matériaux de construction conventionnels qui utilisent de la chaux, du gypse ou du ciment comme matériau de base.

Les premiers 15mm d'un matériau en terre crue peuvent absorber 300g d'eau en 48h lorsque l'humidité relative augmente de 50 à 80%. (À titre de comparaison : le bois absorbe 100g et une brique en terre cuite absorbe 30g dans les mêmes conditions) [9] (p.74-75)

Paramètres : La valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau compare la densité de diffusion du flux de vapeur d'eau dans un matériau de construction avec celle trouvée dans une couche d'air d'une épaisseur équivalente sd. (L'air immobile a une valeur μ de 1.) La valeur tampon d'humidité indique la quantité d'eau transportée (adsorption ou désorption) dans ou hors d'un matériau par surface ouverte, pendant une certaine période, lorsqu'il est soumis à des variations d'humidité relative de l'air ambiant.



Changement de masse des enduits en cas d'exposition à des variations de l'humidité relative

[12] Relevance of Earthen Plasters for Eco Innovative, Cost-Efficient and Healthy Construction

Les résultats (Fig. 32.1) démontrent que les enduits en terre combinés à des plaques de fibres de bois se caractérisent par une capacité d'adsorption de la vapeur d'eau exceptionnelle, qui est jusqu'à trois fois supérieure à celle des plaques de plâtre, comme le démontrent également (Minke 2012 ; Eckerman et Ziegert 2006).» [12] (p.375)

b. Humidité d'équilibre et effet sur d'autres matériaux de construction

[9] Earth Masonry: Design and Construction Guidelines.
[10] Sustainable Building with Earth.

L'humidité d'équilibre désigne la teneur en eau moyenne de l'élément de construction dans son contexte d'utilisation spécifique. Ce niveau est rarement dépassé ou sous-coté dans les conditions standards des espaces intérieurs (40-70 % HR, +20 °C) [10] (p.408). Les matériaux de la gamme Léém ont des valeurs comprises entre 0,5 et 2 % d'humidité d'équilibre. Cette valeur est faible par rapport à d'autres matériaux de construction et, en tant que tels, les matériaux de la gamme Léém peuvent contribuer à assécher et à maintenir au sec d'autres matériaux dans un bâtiment, par exemple dans les systèmes de construction en bois. « Si le matériau terre de l'élément de construction est toujours maintenu sec et que les deux matériaux de construction sont liés de façon permanente, permettant une diffusion efficace, une diffusion de la teneur en humidité d'équilibre du bois vers le matériau de terre se développe : le matériau en terre maintient le bois sec et a un effet de conservation. Cette propriété est particulièrement intéressante pour réduire le risque de moisissures ou d'attaque par des insectes dans le bois » [10] (p.408) et [9] (p.75)

Paramètres : L'humidité d'équilibre désigne la teneur en humidité de l'élément de construction qui s'installe progressivement comme valeur moyenne pendant la durée de vie utile du bâtiment.



Les matériaux de la gamme Léém régulent l'humidité intérieure et sont bénéfiques pour tous ceux qui vivent et travaillent dans ces espaces.



Les matériaux de la gamme Léém gardent les autres matériaux de construction au sec.

2.2.4 Confort thermique

Un climat est considéré comme physiologiquement idéal et confortable lorsque le corps humain est en équilibre thermique avec son environnement. La façon dont une personne perçoit les conditions climatiques varie en fonction de l'âge, de la constitution, du sexe, du régime alimentaire, ainsi que de la capacité d'adaptation au climat. Le climat intérieur est particulièrement influencé par ces facteurs:

- La température de l'air
- Le rayonnement des surfaces environnantes
- L'humidité relative de l'air
- Le mouvement de l'air.

On peut constater ci-dessous comment les matériaux de la gamme Léém ont un impact positif sur le confort thermique grâce aux 3 premiers de ces 4 principes.

a. Inertie thermique, atténuation de l'amplitude de température et déphasage

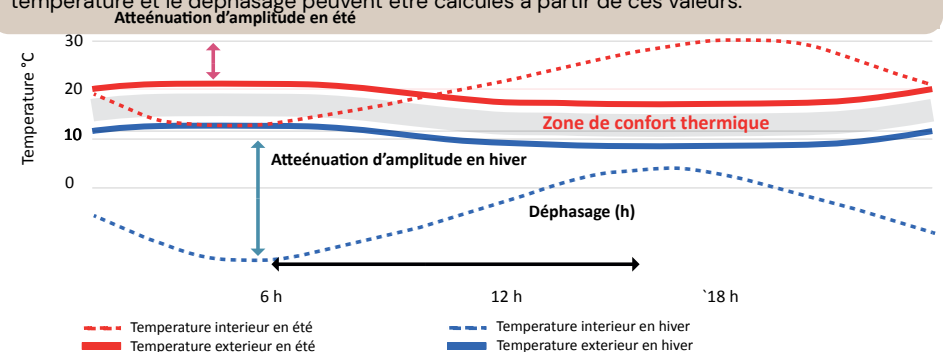
Pendant les périodes de fluctuations rapides des températures extérieures, telles que les maxima diurnes et les minima nocturnes, les éléments de construction capables de stocker la chaleur empêchent l'intérieur du bâtiment de se refroidir ou de se réchauffer trop rapidement. Plus la capacité thermique C d'un élément de construction est élevée et plus son coefficient de transfert de chaleur Λ est faible, plus son efficacité en termes de stockage de chaleur et de refroidissement est grande. Le quotient de ces deux valeurs est appelé inertie thermique d'un élément de construction : il s'agit de la propriété d'un matériau qui exprime la vitesse à laquelle sa température atteint celle de l'environnement.

Les matériaux de construction de la gamme Léém apportent une inertie thermique à votre projet, équilibrant les températures extrêmes de jour et de nuit.

Si l'on observe la surface extérieure et intérieure d'un élément de construction, on constate que les amplitudes de température extérieure qui traversent l'élément de construction s'affaiblissent (s'atténuent) à l'intérieur : c'est ce que l'on appelle l'atténuation de l'amplitude de température. La différence de temps entre les pics des amplitudes de température à l'extérieur et à l'intérieur est appelée déphasage.

Dans un climat tempéré comme celui de l'Europe occidentale, les murs composites doivent offrir une bonne isolation, ainsi qu'une bonne capacité thermique grâce à la masse élevée du mur. Les matériaux de la gamme Léém offrent une bonne capacité de stockage de la chaleur en raison de leur densité élevée, ce qui aide les bâtiments légers tels que les structures en bois à stocker la chaleur en hiver et le froid en été.

Paramètre: Le quotient de la Capacité Thermique C et de la Conductivité Thermique Λ définit la vitesse à laquelle la température d'un matériau de construction atteint celle de l'environnement, également appelé inertie thermique. L'atténuation de l'amplitude de la température et le déphasage peuvent être calculés à partir de ces valeurs.



[11] Wienerberger. Rouge. La Force.

Graphique de zone de confort thermique [11]

[1] Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue – Brique de terre.
[10] Sustainable Building with Earth.

b. Effusivité thermique et diffusivité thermique

Le coefficient d'effusivité thermique b d'un matériau décrit la quantité de chaleur évacuée par le corps humain lorsqu'une personne touche physiquement le matériau. Plus le coefficient d'effusivité thermique b est élevé, plus le corps perd de la chaleur lors du toucher et donc plus le matériau est frais au toucher. Dans les pièces où la température de l'air est élevée, les éléments de construction dont les couches superficielles sont constituées de matériaux ayant un coefficient d'effusivité thermique élevé restent «frais» plus longtemps. Les matériaux de construction lourds tels que la pierre naturelle, le béton et l'acier ont des valeurs b élevées, tandis que les valeurs des matériaux de construction légers tels que le bois, le liège ou les matériaux moussés sont proportionnellement plus faibles.

Les matériaux de la gamme Léém ont une effusivité thermique moyenne et semblent donc «plus chauds au toucher» lorsqu'ils sont laissés apparents. [1] (p.19)
[10] (p.402)

Les matériaux de construction de Léém sont chauds au toucher.

Le coefficient de diffusion thermique a d'un matériau décrit la vitesse à laquelle un matériau est capable de transmettre la chaleur d'un côté à l'autre d'un mur, à des températures variables.

Les matériaux de la gamme Léém ont une diffusivité thermique allant de moyenne à élevée et transfèrent donc la chaleur solaire captée en hiver vers l'intérieur, et inversement ce qui favorise un bon confort de fraîcheur en été.



c. Confort thermique par régulation d'humidité

L'humidité relative du climat intérieur est un facteur important pour le confort thermique de l'homme : une humidité élevée a un effet négatif sur le confort thermique du corps humain, que ce soit à des températures froides ou chaudes.

Les matériaux de la gamme Léém permettent d'obtenir un bon confort thermique en équilibrant l'humidité.

Les matériaux de la gamme Léém régulent l'humidité (see Section 2.2.2), et donc contribuent à un meilleur confort thermique.

- En réduisant l'humidité intérieure en été, les matériaux de Léém rendent les espaces intérieurs plus frais.
- En augmentant l'humidité intérieure en hiver, les matériaux de Léém rendent les espaces intérieurs plus chauds.

Paramètre : L'indice de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau compare la densité de diffusion du flux de vapeur d'eau dans un matériau de construction à celle constatée dans une couche d'air d'épaisseur équivalente sd. (L'air immobile a une valeur μ de 1.) Voyez aussi section 2.2.2

2.2.5 Etanchéité à l'air

Une condition générale pour réduire l'énergie de chauffage est l'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure du bâtiment. Selon le règlement de Lehmabau, les matériaux de construction en terre ayant une densité de 900 kg/m³ ou plus sont considérés comme étanches à l'air. [15] (p.100) Pour les densités inférieures, l'élément de construction doit être recouvert d'un enduit. [4] (p.17) Un minimum de 10 mm d'enduit d'argile est conseillé par Buildwise pour assurer l'étanchéité à l'air. [22] (p.53)

Les matériaux de construction Léém assurent l'étanchéité à l'air de votre bâtiment.

Paramètre : L'étanchéité à l'air à une pression de 50 Pa donne le débit d'air s'échappant de la pièce par heure et par mètre carré.

[4] . ATEx A 2990_V1. Maçonnerie de remplissage
[15] Rapport d'essai Nr. PB 128 001 2022 (Blocs).
[22] NIT 284: Les enduits intérieurs.



© Ringo Gomez-Jorge

2.2.6 Sécurité incendie

La sécurité incendie des matériaux de construction est définies principalement par deux caractéristiques : réaction au feu et résistance au feu.

a. Réaction au feu

La réaction au feu ou la performance au feu est la façon dont un matériau réagit au contact du feu, plus particulièrement en ce qui concerne sa combustibilité.

Les matériaux de la gamme Léém sont incombustible.

Elle est influencée non seulement par le type de matériau, mais aussi par sa forme, sa surface spécifique et sa masse. De façon générale l'incombustibilité des matériaux en terre crue (classe de réaction au feu A1 = MO) est assurée si une des conditions suivantes est respectée [9] (p.87) :

- Moins de 1% de composants organiques [18] (p.19), [19] (p.13), [9] (p.87), [8] (p.19) et [24] (p.15)
- Densité d'au moins 1700 kg/m² [9] (p.87)
- Des données spécifiques de tests au feu [9] (p.87)

Paramètre: La classe de réaction au feu va de A1 à F avec une combustibilité croissante telle que définie dans la norme EN13501. En général, les matériaux de Léém sont classé A1 donc considérés comme incombustibles.



[8] Maçonnerie porteuse en terre crue.

[9] Earth Masonry: Design and Construction Guidelines.

[13] NATURALLY VENTILATED EARTH TIMBER CONSTRUCTIONS

[24] DIN 18947: Mortier de terre pour enduit

[1] Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue - Brique de terre.

[9] Earth Masonry: Design and Construction Guidelines.

[11] Rouge. La Force.

b. Résistance au feu

« La résistance au feu REI d'un mur s'exprime en heures et indique combien de temps le mur résistera en cas d'incendie. Cela signifie que le mur conservera sa stabilité (R) et son étanchéité aux flammes (E), et que la température de l'autre côté du mur restera sous un seuil déterminé par Isolation (I), pour éviter que des objets dans un espace non-touché par le feu ne s'enflamment sous l'effet de la chaleur rayonnante. » [11] (p.49)

Les matériaux de la gamme Léém offrent une grande résistance au feu.

En général, on peut dire que les matériaux à base d'argile et de minéraux ont d'excellentes propriétés de résistance au feu pour les matériaux de construction en terre.

- Stabilité au feu (R) : Sur le plan chimique, la stabilité des matériaux de Léém n'est pas altérée par la cuisson, puisque la terre crue devient la terre cuite. [1] (p.20)
- Étanchéité aux flammes et aux fumées (E) : Une croûte protectrice se forme sous l'effet de la cuisson de la couche superficielle. [1] (p.20)
- Isolation thermique (I) : Un réseau poreux se développe et contribue à favoriser l'isolation thermique. Ce phénomène explique aussi en partie les bonnes propriétés thermomécaniques liées à la stabilité au feu. [1] (p.20)

Néanmoins, il faut porter une attention sur la protection des murs dont on attend une résistance au feu, contre les jets d'extinction, soit par l'application d'une finition protectrice, soit en prévoyant une épaisseur suffisante pour résister à l'érosion de surface causée par la pression de l'eau. [9] (p.87)

Paramètre: La résistance au feu, désigne le temps de maintien au feu des paramètres de stabilité mécanique R, d'étanchéité E et d'isolation thermique I.



Mesure de la résistance au feu au CERIB sur une paroi BTC de 9,5 cm d'épaisseur : avant et après 50 minutes d'exposition au feu [7] (p.160)

2.2.7 Confort acoustique

Le confort acoustique est caractérisé par les différents modes de transmission des sons :

a. Les bruits aériens :

Les sons qui se propagent dans l'air, comme la voix humaine sont appelés bruits aériens. Les éléments de construction peuvent jouer un rôle dans l'atténuation des bruits aériens par:

- Leur transmission : Les essais acoustiques de transmission des bruits aériens examinent la densité surfacique d'un élément de construction (la masse des matériaux en g sur la base de 1 m² de l'élément de construction), ainsi que sa rigidité en flexion et son étanchéité. L'indice d'affaiblissement acoustique R décrit l'isolation aux bruits aériens des éléments de construction. Il est calculé à l'aide de la différence de niveau sonore entre deux pièces, généralement la pièce source et la pièce réceptrice. La valeur de référence la plus importante pour l'évaluation de l'isolation aux bruits aériens est l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré R_w [dB] comme valeur individuelle et simplifiée pour des éléments de construction.[10] (p.419–420)
- Leur absorption : « Les propriétés acoustiques du matériau terre sont encore mal connues aujourd'hui. La terre étant un matériau à porosité ouverte, sa capacité d'absorption acoustique est a priori considérée comme bonne. En effet, une partie de l'énergie acoustique est transformée en chaleur de frottement lorsque les ondes sonores mettent l'air des pores en mouvement. La capacité d'absorption du matériau sera donc d'autant plus importante que sa finition laissera les pores ouverts, sans lissage de la surface. L'adjonction de fibres dans la terre, en augmentant la porosité ouverte du matériau, est également un facteur favorable. Par ailleurs, l'absorption aux fréquences basses augmente lorsque l'épaisseur du matériau augmente.” [7] (p.67)

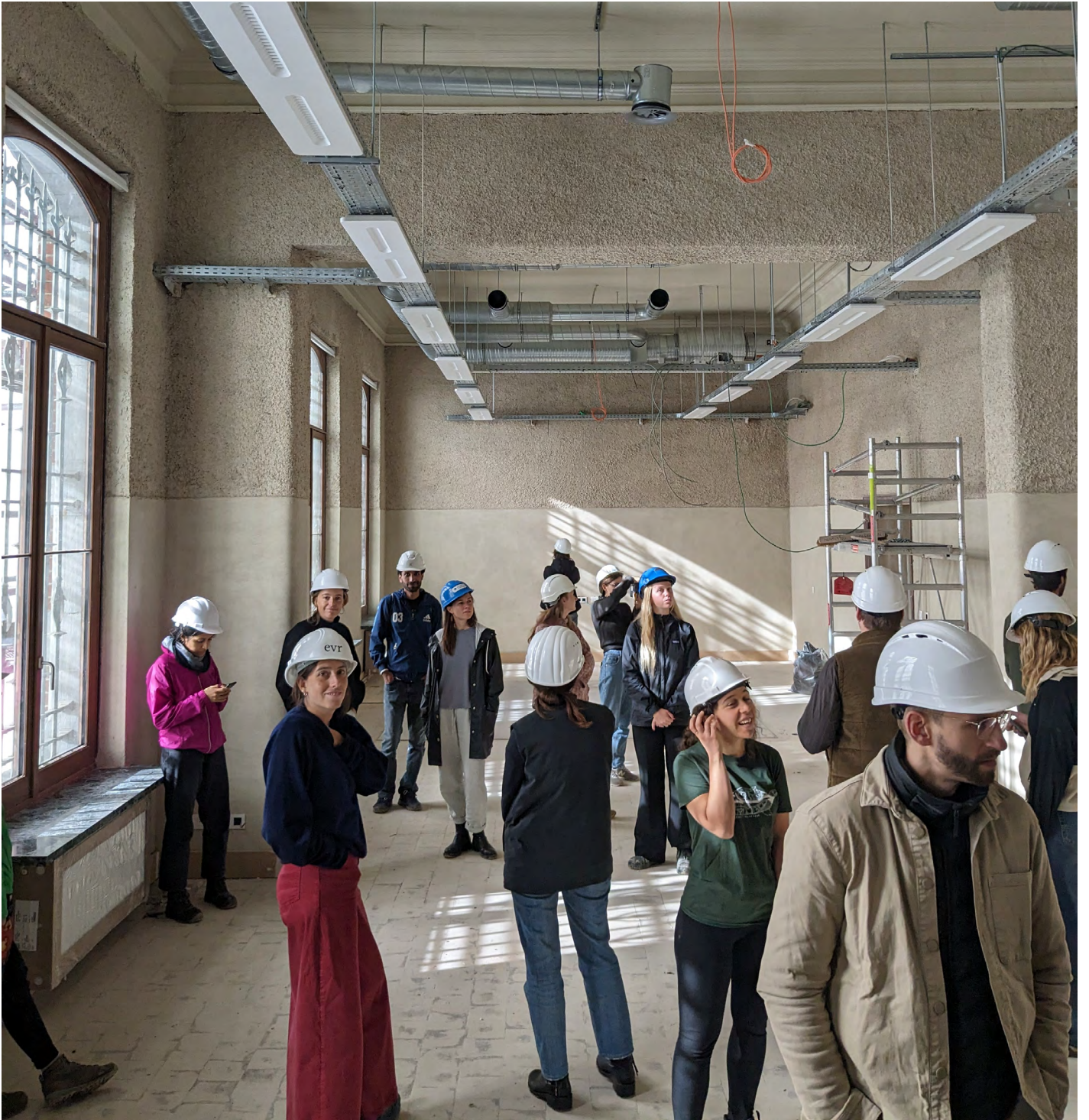
b. Les bruits solidiens :

Les sons qui se propagent à travers les matériaux solides (comme la structure), comme les bruits d'impacts sont appelés bruits solidiens. Les matériaux de la gamme Léém ont une densité élevée, et absorbent bien ces bruits solidiens.

Les essais acoustiques sur les matériaux de construction en terre portent principalement sur les bruits aériens. Compte tenu de la combinaison d'une densité surfacique et d'une porosité élevée, les matériaux de Léém obtiennent des résultats exceptionnels en matière d'isolation acoustique. Cependant, les joints comme raccords entre les matériaux de construction qui ne sont pas totalement remplis, et les fissures sont des points faibles pour l'isolation acoustique.

Les matériaux de Léém ont d'excellentes propriétés acoustiques.

Paramètre : L'isolation aux bruits aériens est mesurée par l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré R_w avec l'ajout d'un facteur de correction des bruits de basse fréquence Ctr.



2.2.8 Durée de vie prolongée

Afin d'évaluer le confort acoustique, nous présenterons tout d'abord comment les La durée de vie d'un matériau de construction peut être estimée par le nombre d'années qu'il se maintient, sans intervention extérieure spécifique (démolition,...). Dans le delta du Rhin-Meuse-Escaut, qui s'étend au nord de la France, en Belgique, au Luxembourg, aux Pays-Bas et dans certaines parties de l'Allemagne, les constructions en terre crue ont prouvé leur durabilité au cours des siècles. Elles ont été construites principalement à l'aide de techniques de construction en terre telles que le torchis, le pisé, la maçonnerie en adobe et les enduits. Aujourd'hui encore, ces bâtiments vernaculaires constituent une grande partie du parc immobilier actuel, principalement dans le nord de la France et en Allemagne. À Weilburg, en Allemagne, on trouve l'exemple d'un bâtiment de sept étages en murs porteurs en pisé, construit en 1830. À Hasselt, en Belgique, la maison Tackoen datant du XVI^e siècle a été construite en colombage avec un remplissage en torchis. De plus, de nombreux monuments européens inscrits au patrimoine de l'Unesco sont construits en terre crue, comme l'Alhambra en Espagne, construit entre le XIII^e et le XV^e siècle. De même, en Belgique et aux Pays-Bas, des constructions vernaculaires en terre du XV^e au XVIII^e siècle sont aujourd'hui toujours habitées.

Cette utilisation des bâtiments à travers les siècles démontre le potentiel d'une longue durée de vie des techniques de construction en terre, dépassant les maigres 50 ans de durée de vie actuellement attribués dans les calculs de l'Analyse du Cycle de Vie.

Les matériaux de la gamme Léém s'inscrivent dans cette tradition vernaculaire de longue durée de vie. Cependant, ils sont également testés et certifiés suivant tous les référentiels et normes actuels. Les résultats de ces tests se trouvent dans les Fiches Techniques des différents matériaux de la gamme Léém, téléchargeables sur le site leem.works . C'est l'ensemble de ces tests qui informe sur la durée de vie. Cependant, certains tests spécifiques permettent d'avoir une idée précise de la durée de vie des matériaux de Léém exposés : les tests d'abrasion et les tests d'impact.

Les matériaux de construction de la gamme Léém sont résistants aux chocs et à l'abrasion et sont durables.

L'abrasion est le processus de raclage ou d'usure de la surface du matériau de construction. L'impact correspond au processus de rupture soudaine et localisée du matériau. La résistance à l'abrasion et à l'impact de la maçonnerie en blocs de terre est influencée par l'importance de la force de broyage et d'impact, la solidité et la régularité de la surface et les propriétés de la terre utilisée (force de cohésion, distribution des grains, forme des grains et angularité) et de ses agrégats.

Paramètres : Paramètres de résistance mécanique comme la résistance à l'abrasion, la résistance à l'impact, ...

L'Analyse de Cycle de Vie définit la durée de vie standard des matériaux de Léém à 50 ans tout comme les matériaux traditionnels.

1. Bâtiment vernaculaire en pisé,
Weilburg, Allemagne



2. Bâtiment vernaculaire en torchis
Hasselt, Belgique.



2.2.9 Pas d'expositions aux radiations (Radon)

Tous les êtres vivants sur terre, y compris les humains, sont exposés à des rayonnements ionisants. L'exposition naturelle non modifiée comprend les rayonnements cosmiques et terrestres ainsi que l'incorporation de matières radioactives (ingérées dans les aliments). Il y existe également l'exposition naturelle modifiée par l'homme sous la forme de matériaux de construction et par l'inhalation de Radon à l'intérieur des bâtiments, ainsi que l'exposition artificielle dans le cas de diagnostics et thérapies médicales ou à la suite de la catastrophe de Tchernobyl [20].[10] (p.421-424)

Les matériaux de la gamme Léém ne sont pas radioactifs

Les terres et les argiles peuvent généralement être considérés comme «exempts» de radiation naturelle s'ils ne proviennent pas de roches contenant des radiations de radon. [10] (p.421-424) En ce sens, les matériaux de la gamme Léém sont inoffensifs en termes de rayonnement ionisants. (Ce n'est pas toujours le cas pour d'autres matériaux de construction, comme le gypse, dont les niveaux de rayonnement sont supérieurs à la valeur de référence considérée comme inoffensive).

Paramètre : Indice de concentration d'activité I

2.2.10 Blindage contre les rayonnements électromagnétiques à haute fréquence

Le transfert de données sans fil et la technologie cellulaire utilisent des ondes à haute fréquence de l'ordre de 10 à 100 kHz sur toute la gamme des MHz jusqu'à 150-300 GHz. Le transfert est facilité par un vaste système d'émetteurs. Celui-ci génère un rayonnement électromagnétique à haute fréquence qui, pour les fonctions les plus courantes de la communication cellulaire et GPS, se situe dans la gamme de fréquences de 890 à 2170 MHz. Les caractéristiques des ondes HF sont similaires à celles des ondes lumineuses : en cas d'impact avec un objet, tel qu'un bâtiment, elles sont réfléchies ou traversent l'objet, en fonction de la nature du matériau.

Les matériaux de Léém protègent des radiations.

Comparés à d'autres matériaux de construction minéraux, les matériaux de Léém ($\rho_d = 1600 \text{ kg/m}^3$) ont un effet d'atténuation significativement élevé comparé, par exemple aux briques cuites alvéolées ($\rho_d = 1200 \text{ kg/m}^3$) ou aux blocs silico-calcaires ($\rho_d = 1800 \text{ kg/m}^3$) de même épaisseur. [10] (p.425)



3. Conseils de fin de vie



La gestion des déchets est bien établie en Europe, et plus particulièrement en Belgique. Des directives et des règlements sur les déchets ont été mis en place afin de contrôler la manière d'éliminer, de recycler ou de réutiliser les matériaux (de construction) standards à la fin de leur vie : PUR, béton, aluminium, acier, ...

La gamme de matériaux de Léém veut mettre en avant les avantages de la construction en terre en termes de gestion des déchets. Construire avec les matériaux de Léém, c'est construire localement avec la couche superficielle de la terre sans altérer chimiquement ces mélanges de terre : il s'agit essentiellement de terre, façonnée dans une forme spécifique. Cette transformation étant réversible, cela signifie qu'il n'y a que peu ou pas d'énergie nécessaire pour le recyclage ou la réutilisation. Le concept d'élimination est également bouleversé : les matériaux de la gamme Léém sont réversibles, ce qui signifie qu'ils peuvent être «rendus» à la terre à la fin de leur cycle de vie. Ce scénario de fin de vie vernaculaire, low-tech et de bon sens n'est pas possible avec les autres matériaux de construction standards actuellement sur le marché : comment «rendre» le PUR, le béton, l'aluminium et l'acier à notre planète ?

Dans cette 3ème partie, nous examinons comment les matériaux de construction réversibles en terre tels que ceux de la gamme Léém s'intègrent dans nos directives et cadres réglementaires actuels en matière de déchets. Nous proposons également différents scénarios de fin de vie spécifiques aux matériaux de Léém : un Programme de Reprise pour un Recyclage en Boucle Fermée, ainsi que les possibilités uniques de Réemploi des matériaux de Léém.

Le suivi de ces flux de matériaux de Léém démolis est nécessaire avant que ces scénarios de fin de vie ne soient possibles. Pour présenter les possibilités de fin de vie des matériaux de Léém dans les sections ci-dessous, nous utilisons le travail du Dr Horst Schröder tel qu'il a été présenté dans son ouvrage «Sustainable building with earth» (construction durable en terre) [10].



© Alexander D'Hier

3.1 Cadre légal

Dans cette section, nous nous limitons ici à mentionner les cadres légaux applicables lorsque l'on souhaite éliminer, recycler ou réutiliser des matériaux de construction.

Cadre légal en Europe:

Les principes généraux relatifs aux déchets sont actuellement définis dans la directive 2008/98 du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets. Cela inclut les déchets de construction et de démolition, qui sont des «déchets générés [par] les activités de construction et de démolition» (art. 3, 2c de la Directive-Cadre Relative aux Déchets).

Cadre légal en Belgique:

En Belgique, la politique des déchets relève de la compétence des régions. Celles-ci ont transposé la Directive-Cadre Relative aux Déchets, avec leurs propres nuances ou particularités.

En Flandre:

Le décret flamand du 23 décembre 2011 relatif à la gestion durable du cycle des matériaux et des déchets (« décret matières ») adopte la Directive-Cadre Relative aux Déchets, dont il reprend la définition du terme « déchets ». Le catalogue flamand des déchets se trouve à l'annexe 2.1 du décret du gouvernement flamand établissant la réglementation flamande sur la gestion durable du cycle des matériaux et des déchets («Vlarema»). L'administration régionale flamande compétente est l'OVAM. Un «plan de succession de démolition» est requis lors de la demande d'un permis d'environnement pour certains travaux de démolition, de démantèlement et de rénovation. Le plan de suivi des déchets de la démolition est un outil pour la démolition sélective et la collecte sélective sur site.

En Wallonie:

Le décret wallon du 27 juin 1996 relatif aux déchets («décret wallon sur les déchets») traduit assez fidèlement la Directive-Cadre Relative aux Déchets, dont il reprend mot pour mot la définition du terme «déchet». Un décret du gouvernement wallon du 10 juillet 1997 («catalogue AGW») a établi le «catalogue wallon des déchets» avec des codes de déchets basés sur la liste européenne des déchets.

A Bruxelles:

Le Brudalex (Bruxelles-Déchets-Afvalstoffen-LEX) fournit à la Région de Bruxelles-Capitale un cadre légal pour passer à une économie circulaire, en réduisant les formalités administratives et en encourageant la collecte sélective et la réutilisation des déchets. Brudalex 2.0, adopté le 23 juin 2022, modifie le précédent décret de 2016 et renforce la transition de la Région vers une économie plus circulaire.

3.2 Démolition

[10] Sustainable Building with Earth.
Springer International Publishing

La première action dans un scénario de fin de vie des matériaux de Léém est la démolition des éléments de construction. Cette opération doit se dérouler d'une certaine manière, afin de permettre la mise en place d'un scénario de Recyclage en Boucle Fermée et de Réemploi.

«Les structures constituées de matériaux de construction en terre sont démolies à l'aide de méthodes mécaniques. Ces méthodes doivent permettre une récupération ciblée des matériaux de démolition correctement triés en vue de leur recyclage, en l'occurrence les blocs de terre crue, le mortier de terre crue, les blocs de terre stabilisée et le mortier de terre stabilisée. [...] Les travaux de démolition de structures en terre génèrent généralement une grande quantité de poussière qui constitue une menace pour la santé des travailleurs. Afin de limiter cette exposition, les éléments de construction prévus pour la démolition peuvent être aspergés d'eau. Cette opération doit être effectuée avec précaution en raison de la solubilité dans l'eau des matériaux de construction en terre et du risque éventuel de mélanger les matériaux en terre avec d'autres matériaux de démolition. « [10] (p.507)

Si cela est fait correctement, la poussière peut être évitée, ce qui réduit considérablement l'impact environnemental des matériaux respectifs de Léém (dans l'indicateur «Particulate Matter» de l'Analyse du cycle de Vie).

Si l'on envisage spécifiquement la réemploi des matériaux de Léém, les principes généraux de la démolition en vue de la réemploi s'appliquent : logistique gérable, facilité de déconstruction en termes d'accessibilité, possibilités de désassemblage en ce qui concerne les couches de matériaux adjacentes, les conditions de charge,

3.3 Conditions pour le recyclage des matériaux de la gamme Léém

[10] Sustainable Building with Earth.
Springer International Publishing

A l'heure actuelle, l'espace disponible dans les décharges devient rare et de plus en plus cher. «Les déchets de construction représentent de loin la plus grande part du volume total des déchets. La réduction du volume annuel des déchets de construction pourrait contribuer considérablement à la diminution de la demande d'espace dans les décharges, notamment en trouvant d'autres utilisations pour les déchets de «terre d'excavation». [10] (p.510) Les stratégies de Recyclage en Boucle Fermée et de Réemploi peuvent contribuer de manière significative à la réduction des quantités de déchets de construction. Cependant, il existe des conditions préalables pour que cela soit possible :

Les conditions générales [10] (p.511-512) pour la réutilisation ou le recyclage des matériaux de construction sont les suivantes :

L'aptitude technique:

L'aptitude technique des matériaux de construction en terre recyclée dépend largement de la pureté du matériau obtenu lors de la démolition. [...] . En termes de facilité d'utilisation, aucune exigence technique avec des critères quantifiés pour les matériaux en terre recyclée n'a été formulée jusqu'à présent. [10] (p.512)

Sécurité environnementale:

Pendant la durée de vie du bâtiment ou de la structure, les éléments de construction en terre peuvent être exposés à un certain nombre de substances différentes. Cela peut limiter ou exclure la réutilisation de ces matériaux de construction en terre. Dans certains cas, cette exposition peut même entraîner des problèmes d'élimination des matériaux dans le respect de l'environnement. Il s'agit notamment de:

- Sels
- Polluants atmosphériques
- Pourriture sèche et moisissures
- Les éléments liés à l'hygiène, telles que la fixation des odeurs et des germes dans les bâtiments d'élevage démantelés" [10] (p.512-513)

En particulier, « La cristallisation des sels, souvent liée à une accumulation de molécules d'eau (hydratation), entraîne une augmentation du volume. L'augmentation du volume et les cycles répétés de gel et de dégel détruisent la résistance structurelle des matériaux de construction en terre dans la zone touchée. La résistance moindre des matériaux de construction en terre par rapport à la brique et au ciment entraîne une dégradation plus rapide du matériau. L'écaillage en forme de coquille des zones détachées entraîne un affaiblissement de la section transversale structurellement efficace des murs extérieurs porteurs (Fig. 5.13). En conséquence, le matériau chargé de sel devient pratiquement pulvérisé à l'extérieur. L'altération chimique des minéraux argileux entraîne une perte importante des propriétés plastiques (mais aussi de la résistance du sol). Cela limite ou empêche la réutilisation du matériau en tant que terre recyclée ». [10] (p.429)

[10] Sustainable Building with Earth.
Springer International Publishing

Hauteur cm	Schéma	Nom	Formule chimique	Solubilité par 100 ml d'eau
50		Nitrate de calcium	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	226
		Nitrate de sodium	NaNO_3	92
		Chlorure de calcium	CaCl_2	75
		Halite	NaCl	39
		Chlorure de potassium	KCl	24
20		Sel de glauber	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	92
		Sulfate de magnésium	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	71
		Nitrate de potassium	KNO_3	13
0		Lime	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.3

Types et répartition des sels nocifs autour des fondations et des murs de soutènement [10]

3.4 Scénarios de fin de vie pour les matériaux de la gamme Léém

[10] Sustainable Building with Earth.
Springer International Publishing

Si les conditions préalables au recyclage ou à la réutilisation sont respectées, différents scénarios de fin de vie sont possibles pour un matériau de construction Léém :

Réemploi: Le Réemploi des blocs de terre pour la maçonnerie, c'est-à-dire leur utilisation pour le même usage, constitue la stratégie de maintien de la valeur la plus élevée possible et est donc la plus souhaitable. En effet, le travail incorporé (entropie) qui a été appliqué au matériau de construction en terre est conservé dans le matériau de construction «façonné» lui-même. [10] (p.520) Le bloc de terre de Léém est déjà prêt à être maçonné à nouveau sur le même chantier (ou sur un autre). Le même principe s'applique à d'autres matériaux de la gamme Léém, comme l'enduit d'argile de Léém, qui peut être gratté sur le mur et remélangé sur place avec de l'eau et réappliqué sans perte de qualité : aucune intervention de recyclage n'est nécessaire de la part d'un producteur de matériaux tel que BC materials.

Recyclage en Boucle Fermée: Le Recyclage en Boucle Fermée est un processus de recyclage par lequel un produit manufacturé est recyclé pour le même usage ou la même fonction sans dégradation ou déchets significatifs. Le recyclage des matériaux en terre en boucle fermée peut se faire en les broyant ou en les concassant et en les remodelant, qu'ils aient été ou non mélangés à de nouvelles ressources en terre. Dans le cadre du Recyclage en Boucle Fermée, les nouveaux matériaux de la gamme Léém sont (partiellement) fabriqués à partir de matériaux de Léém démolis avec un besoin minimal d'énergie.

Le Recyclage en Boucle Ouverte: Le Recyclage en Boucle Ouverte est un processus de recyclage qui repousse l'élimination en convertissant les produits manufacturés à la fois en nouvelles matières premières (qui peuvent être utilisées comme intrants de production) et en déchets. Pour les matériaux de Léém, on pourrait envisager des processus similaires au lavage des quantités excédentaires du béton frais, par exemple, afin de récupérer certaines fractions de sables et de graviers tout en éliminant les matériaux argileux et limoneux plus fins. Le recyclage en boucle ouverte des matériaux de la gamme Léém est donc une possibilité technique, mais il convient de déterminer si la mise en place d'un tel processus présente une valeur ajoutée sur le plan environnemental et/ou économique.

Downcycling («sous-cyclage»): Les matériaux de construction en terre recyclés (y compris les matériaux endommagés par le sel) peuvent également être utilisés comme matériau de remblai dans la construction de la couche de fondation. Il en va de même pour les matériaux de construction en terre contaminés par des spores de pourriture sèche ou récupérés dans des bâtiments agricoles. [10] (p.520-522) Les matériaux démolis doivent respecter les limites des substances nocives pour l'environnement conformément aux directives et réglementations des trois régions belges.

L'élimination des matériaux de construction en terre: «Même si toutes les mesures de recyclage sont intensifiées, il n'est pas toujours possible de réintroduire les matériaux de construction résiduels dans le cycle des matériaux. Dans ce cas, leur élimination en tant que «déchets inertes» ne peut être évitée.» [10] (p.522)

En termes de scénarios d'élimination, il est intéressant de distinguer 4 catégories de matériaux de Léém :

- Contenant de la terre : uniquement des argiles, des limons, des sables et des graviers naturels : Enduits d'argile de Léém, Blocs Moulés de Léém, Mortier de Terre de Léém.
- Contenant de la cellulose : cellulose en plus des argiles, limons, sables et graviers naturels : Enduit d'Argile Fin de Léém, Peinture à l'Argile de Léém, Mortier Colle de Léém.
- Contenant du béton recyclé : béton recyclé en plus des argiles, limons, sables naturels : Mélanges de Pisé de Léém
- Contenant du ciment : du ciment en plus des argiles naturelles, des limons, des sables et du béton recyclé : Blocs Compressés de Léém

Cependant, on peut se demander si les matériaux de construction en terre qui ont été testés comme étant uniquement de la terre (matériaux de Léém contenant de la terre et peut-être aussi de la cellulose), devraient être traités plutôt comme de la «terre» que comme des «déchets inertes». Pour de la terre, il existe différentes stratégies d'élimination moins impactantes : aménagement paysager, utilisation agricole, ... ou un retour à la couche superficielle du sol. Cependant, les cadres juridiques actuels en Belgique ne permettent pas cette stratégie d'élimination. Nous pensons que ce sujet sociétal devrait être discuté lorsque le secteur de la construction en terre gagnera en importance et en part de marché.

Pour l'instant, nous encourageons autant que possible la Réemploi des matériaux de Léém, ou l'utilisation du programme de Reprise de Léém pour le Recyclage en Boucle Fermée (voir section 3.5).

Le tableau ci-dessous présente quelques applications possibles des matériaux en terre recyclés :

No.	Matériaux de construction en terre	Réemploi par dé/réconstruction	Réutilisation par préparation + façonnage	Closed Loop Recycling at BC materials	Recyclage à la baisse	Commentaire
1	Pisé		✓	✓	✓	
2	Bauge		✓		✓	
3	Torchis		✓		✓	
4	Terre allégée				✓	
5	Remplissage	✓				
6	Blocs de terre moulé et extrudé	✓	✓	✓	✓	
7	Blocs de terre compressé stabilisé	✓		✓	✓	
8	Plaques d'argile	✓			✓	Tenir compte du revêtement de surface
9	Mortier de terre		✓	✓	✓	Tenir compte du revêtement de surface
10	Enduit d'argile		✓	✓	✓	Tenir compte du revêtement de surface

Possibilités de recyclage de matériaux en terre crue [10] (p.520)

3.5 Programme de Reprise de Léém

Pour les Enduits d'Argile de Léém, les Mortiers de Léém, les Blocs de Léém, le Pisé de Léém et la chape de Léém, BC materials a mis en place un Programme de Reprise, qui consiste à récupérer ces matériaux uniquement s'ils sont exempts de matériaux de construction non terreux, de substances nocives (NI et NA de la Région bruxelloise et de la Région flamande de Vlarebo), d'amiante, de PCB, de PFAS et de sels (DIN18945). Voici les conditions de reprise spécifiques pour chaque catégorie de matériaux de Léém :

Blocs Moulés de Léém:

Les blocs de terre récupérés et non endommagés doivent être nettoyés manuellement des résidus de mortier qui y adhèrent. Ils doivent être empilés et stockés sur palettes à l'abri des intempéries. BC materials évaluera quels blocs peuvent être réutilisés et quels blocs peuvent être recyclés en boucle fermée.

Bloc Compressés de Léém:

Idem au Blocs Moulés de Léém

Enduits d'Argile de Léém, Mortier de Léém:

Le mortier ou enduit récupéré doit être exempt d'autres matériaux de construction et apporté dans des bigbags ou, sur autorisation, en vrac.

Maçonnerie de Léém:

La maçonnerie en blocs de terre démolis récupérés avec des résidus de mortier de terre adhérent doit être exempte d'autres matériaux de construction et apportée dans des bigbags ou, sur autorisation, en vrac.

Pisé de Léém:

Le pisé récupéré doit être exempte d'autres matériaux de construction et être apportée en bigbags ou, sur autorisation, en vrac.

Chape de Léém:

La terre de chape récupérée doit être exempte d'autres matériaux de construction et être apportée en bigbags ou, sur autorisation, en vrac.

3.6 Les bénéfices de l'ACV

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) d'un matériau de construction est une évaluation quantifiable de son impact sur l'environnement en millipoints (voir section 2). Dans une ACV conforme à la norme EN 15804, les scénarios de fin de vie expliqués ci-dessus - Réemploi et Recyclage en Boucle Fermé - ont des effets dans les modules A1-A3, C1-C4 et D :

Bénéfices sur le module A1:

Pas ou moins de ressources primaires sont nécessaires lorsque les matériaux repris sont utilisés comme ressources secondaires.

Bénéfices sur les modules A2 et A3:

Pas d'impact sur le transport ni sur la fabrication lors de la Réemploi des matériaux de Léém.

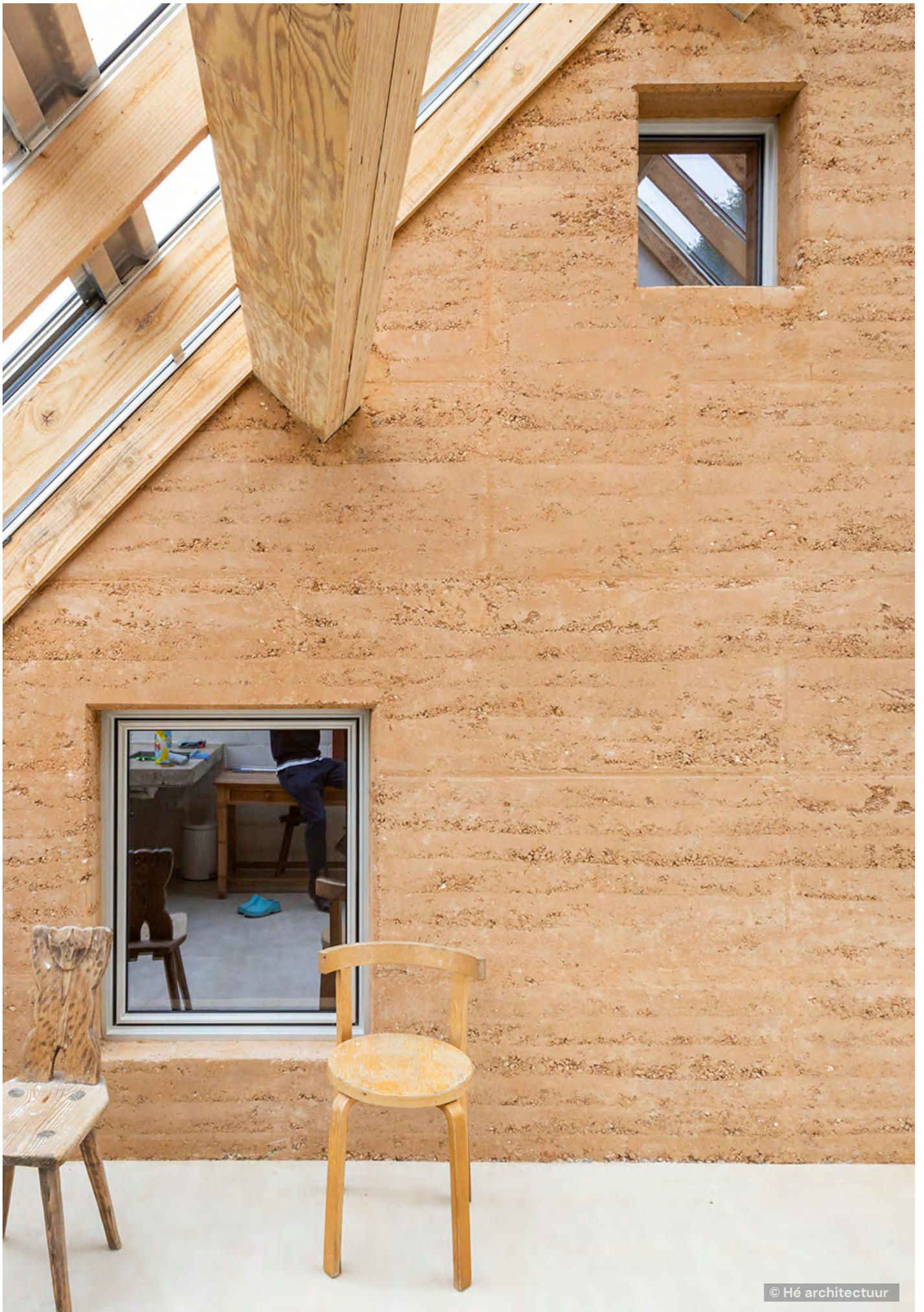
Bénéfices sur les modules C1-C4:

Les ressources requises pour la récupération d'un matériau de construction en terre en tant que matière secondaire sont déterminées comme facteurs d'entrée dans les modules C1-C3. Ces ressources sont moindres que si ces matériaux étaient éliminés et que de nouveaux matériaux devaient être produits à partir de ressources 100 % primaires. Et bien sûr, l'étape C4 est éliminée. Dans l'étape C1, l'indicateur de « particulate matter » est réduit en raison de la production de poussière évitée.

Bénéfices du module D:

Les résultats nets du Recyclage en Boucle Fermée ou le Réemploi des ressources secondaires récupérées, et les matières premières primaires substituables pour la production d'un matériau de construction en terre, sont évalués.

La réduction de l'impact sur l'environnement est la principale raison d'entreprendre la Réemploi ou le Recyclage en Boucle Fermée des matériaux de Léém.



© Hé architectuur

4.

Références

1. Confédération de la construction en terre crue. Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue – Brique de terre. Edited by Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales. Ministère de la transition écologique et solidaire, 15 octobre 2020.
2. CSTB, and Briques Technic Concept. ATEx A BTC 2957_V1. Murs porteurs BTCS. 5 octobre 2021.
3. CSTB, and SCIC Cycle Terre. ATEx 2991_V1. Parement intérieur. 1 février 2022.
4. CSTB, and SCIC Cycle Terre. ATEx A 2990_V1. Maçonnerie de remplissage. 1 février 2022.
5. CSTB, and SCIC Cycle Terre. Cloisons BTC. 10 Mai 2021.
6. CSTC. NIT 271. Exécution des maçonneries.
7. Cycle Terre. Guide de conception et de construction. Mai 2021.
8. Institut allemand de normalisation. DIN 18940. Maçonnerie porteuse en terre crue. octobre 2022.
9. Morton, Tom. Earth Masonry: Design and Construction Guidelines. IHS BRE Press, 2008.
10. Schroeder, Horst. Sustainable Building with Earth. Springer International Publishing, 2015.
11. Wienerberger. Rouge. La Force.
12. Klinge, Andrea, and al. "Chapitre 32: The Relevance of Earthen Plasters for Eco Innovative, Cost-Efficient and Healthy Construction—Results from the EU-Funded Research Project [H]house." *The Extracellular Matrix: Methods and Protocols*, edited by Davide Vigetti and Achilleas D. Theocharis, Springer New York, 2019, pp. 371-382.
13. Klinge, Andrea, and al. NATURALLY VENTILATED EARTH TIMBER CONSTRUCTIONS (Conference Expanding Boundaries: Systems Thinking for the Built Environment). Conference paper. Zurich, 15-17 June 2016.
14. SIPIZ Laboratoire d'incendie, and Terrabloc. Rapport d'essai Nr. PB 128 001 2022 (Blocs). 24 octobre 2022.
15. SIPIZ Laboratoire d'incendie, and Terrabloc. Rapport de test Nr. PB 128 001 2021 (Plaques). 5 juillet 2021.
16. Empa, and Terrabloc. Rapport d'essai n° 5214027285 (Terraplaç). 1 juillet 2021.
17. Dachverband Lehm e. V. Lehmbauregeln. 3. Auflage, Vieweg + Teubner ed., 2009.

18. Institut allemand de normalisation. DIN 18945: Blocs de terre – Exigences, essai et étiquetage. Décembre 2018.
19. Institut allemand de normalisation. DIN 18946: Mortier de terre pour maçonner – Exigences, essai et étiquetage. December 2018.
20. Graham, C.W., et al. MOVEMENT COEFFICIENTS OF COMPRESSED EARTH MASONRY UNITS. 10th Canadian Masonry Symposium, Banff, Alberta, June 8 – 12, 2005, June 2005.
21. Sutton, Andy, et al. "Unfired clay masonry." Edited by University of Bath. Information paper, vol. 16/11.
22. CSTC. NIT 284: Les enduits intérieurs. Novembre 2022.
23. GUILLAUD, H. (2006) TRAITE DE CONSTRUCTION EN TERRE. Place of publication not identified: PARENTHESSES EDITIONS.
24. Institut allemand de normalisation. DIN 18947: Mortier de terre pour enduit – Exigences, essai et étiquetage. Décembre 2018.
25. Shakantu, Winston, et al., The hidden cost of transportation of construction materials: An overview, Journal of Engineering Design and Technology 1(1):103–118, December 2003
26. Pisman, A., Vanacker, S. (2021). Diagnosis of the State of the Territory in Flanders. Reporting About New Maps and Indicators Differentiating Between Urban and Rural Areas Within Flanders. In: Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions. SSPCR 2019. Green Energy and Technology. Springer, Cham.
27. Beleidsplan Ruimte Vlaanderen, <https://omgeving.vlaanderen.be/nl/beleidsplan-ruimte-vlaanderen>
28. Schéma de développement du territoire (SDT), https://lampspw.wallonie.be/dgo4/site_amenagement/amenagement/sdt
29. Bleby, Michael, Embodied water' is the latest challenge for the building industry, <https://www.afr.com/property/commercial/construction-s-next-cost-challenge-embodied-water-20230328-p5cvvm>
30. A. Janssen, L. Delem, L. Wastiels, and J. Van Dessel, Rapport n° 17 : Principes et aspects importants pour le choix de matériaux de construction durables, 2016

5. Remerciements et crédits

Ce Guide Général de Léém est une compilation par BC materials des publications de recherche les plus récentes, des agréments techniques et des normes établis en Allemagne et en France, mis à jour avec des recherches supplémentaires spécifiques et l'expérience de BC materials et de Buildwise dans le contexte du Benelux. Il n'aurait pas été possible sans la contribution spécifique des personnes suivantes. Merci à:

En Allemagne, Dr. Horst Schröder pour son livre complet «Sustainable building with earth» et son travail innovant sur le cadre EPD des matériaux de construction en terre, et Ing. Stephan Jörchel du Dachverband Lehm bau pour sa facilitation.

Ce guide a été financé par le UE – fonds européen NextGeneration de l'UE.



**Financé par
l'Union européenne**
NextGenerationEU

Nous avons fait de notre mieux pour clarifier toutes les références de textes et d'images dans ce guide. N'hésitez pas à nous contacter à l'adresse info@bcmaterials.org si vous découvrez des textes ou des images non référencés ou mal référencés.

Tout le contenu de ce guide qui a été créé par BC materials est sous licence Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. Veuillez nous contacter au préalable si vous souhaitez utiliser ce contenu à des fins commerciales.

