

La terre crue comme alternative au béton ? Une évaluation de son impact sur le métabolisme des chantiers de BTP

Corinne Blanquart^{1,*} , Emmanuelle Moesch²  et Thomas Zeroual³ 

¹ Économie, Université Gustave Eiffel, SPLOTT, Paris, France

² Génie urbain, Université Gustave Eiffel, SPLOTT, Paris, France

³ Économie, ESCE International Business School, Omnes Education, Paris, France

Reçu le 11 janvier 2022. Accepté le 13 septembre 2023

La construction est un secteur d'activité qui a des impacts environnementaux extrêmement importants que ce soit en termes d'extraction de matériaux, de consommation d'eau, d'émissions de gaz à effet de serre ou de production de déchets. Cela a conduit les acteurs de l'aménagement à explorer des alternatives au « tout béton ». La terre crue en est une. C'est à ce matériau que s'intéressent les auteurs de l'article. Ils ont ainsi mené une étude comparative originale sur le métabolisme du chantier de construction de la ZAC Sevrans Terre d'avenir, qui prend place dans les travaux d'aménagement du Grand Paris, et auquel les autorités ont voulu conférer une haute valeur environnementale. Les auteurs testent ainsi différents scénarios selon la quantité de terre crue susceptible d'être intégrée dans le projet. Même si le béton demeure la matière dominante, quel que soit le scénario envisagé, les résultats offrent des perspectives intéressantes pour le recours croissant à la terre crue.

La Rédaction

Résumé – Le secteur du bâtiment et des travaux publics génère un impact très élevé sur l'environnement. Il contribue notamment au réchauffement climatique et à l'épuisement des ressources. Pour faire face à ces enjeux, les aménageurs se tournent vers de nouveaux matériaux. Proposant un approvisionnement local et de faibles impacts environnementaux en phase de production, la terre crue semble être une piste intéressante. Nous souhaitons, dans cet article, évaluer les volumes de flux entrants sur la base des surfaces à construire et des typologies de bâtiments d'un terrain réel : la ZAC Sevrans Terre d'avenir. L'originalité de notre travail est de proposer une estimation des quantités d'éléments constructifs en terre crue pouvant être intégrés à l'opération d'aménagement, selon plusieurs scénarios faisant varier leur taux d'utilisation.

Mots-clés : ville / territoire / métabolisme urbain / béton / terre crue

Abstract – **Raw earth as an alternative to concrete? An assessment of its impact on the metabolism of construction sites.** The building and public works sector is one of the biggest contributors to the impact of human activity on the environment. It contributes in particular to global warming and the depletion of resources, with non-metallic minerals being the most consumed materials in the world. To meet these challenges, planners are turning to new materials. Raw earth seems to be an interesting option, as it offers a locally available material and low environmental impact during production. In this article, we wish to evaluate the volumes of incoming flows based on the size of the projected building area and typologies of buildings in a real situation, the Sevrans Terre d'avenir (ZAC) project. We will then integrate the raw earth building components proposed in the framework of the Cycle Terre project, which supervised the construction of a factory in this same city. Our objective is in line with the work on urban metabolism. The originality of our article is to suggest an estimate of the quantities of raw earth constructive elements that can be integrated in the development operation, according to several scenarios with varying rates of use.

Keywords: city / territory / urban metabolism / cement / raw earth

*Auteur correspondant : corinne.blanquart@univ-eiffel.fr

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) est l'un des plus gros contributeurs aux impacts de l'activité humaine sur l'environnement. Il contribue notamment au réchauffement climatique, avec près de 40 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales (IEA et UNEP, 2019), à l'épuisement des ressources, les minéraux non métalliques étant les matériaux les plus consommés dans le monde (Bringezu *et al.*, 2017) et à l'érosion de la biodiversité via l'artificialisation et l'extraction de ressources.

Les études de métabolisme urbain, défini comme le « processus par lequel un territoire consomme et rejette la matière et l'énergie » (Bognon *et al.*, 2018 ; Barles, 2010 ; 2008), ont montré que les matériaux de construction constituent les matières les plus consommées par les villes après l'eau (Augiseau, 2019). Outre les volumes de flux, les impacts de la construction viennent également de la nature des matériaux mobilisés dans les processus constructifs et en particulier de l'utilisation massive du béton (Bendixen *et al.*, 2019). Les impacts environnementaux du béton sont, en effet, liés aux importantes émissions de CO₂ induites par l'exploitation des granulats, la préparation des mélanges et leur transport sur le site, la fabrication du ciment. Pour faire face à ces enjeux, les aménageurs se tournent vers d'autres matériaux. Disponible localement et faisant valoir de faibles impacts environnementaux en phase de production, mais aussi une recyclabilité à 100 %, la terre crue semble être une piste intéressante (Morel *et al.*, 2001 ; Cycle Terre, 2021).

Utilisée depuis des millénaires dans le monde, la construction en terre crue a été progressivement abandonnée au cours du XX^e siècle (Hamard *et al.*, 2016). Malgré un regain d'intérêt pour ce matériau depuis les années 1970, son utilisation en dehors de la rénovation du patrimoine en terre crue existant reste marginale (Morel et Charef, 2019). Outre les études historiques, la littérature académique propose principalement des approches portant sur les propriétés techniques de la terre crue. Par ailleurs, les études de métabolisme urbain portant sur les flux de BTP s'effectuent surtout à l'échelle d'un pays ou d'une région.

Nous souhaitons dans cet article évaluer l'intérêt de l'intégration de la terre crue dans un projet d'aménagement en partant d'un cas réel (la ZAC Sevrans Terre d'avenir) et les produits de la Fabrique Cycle Terre¹. Le travail proposera donc à la fois un apport méthodolo-

gique pour évaluer ces variations en estimant les quantités d'éléments en terre crue nécessaires et des résultats empiriques issus de notre terrain d'étude.

La première partie reviendra sur les vertus affichées de la terre crue, mais aussi sur les carences quant à l'analyse des impacts de son utilisation sur le métabolisme global des projets.

La deuxième partie détaillera la méthode utilisée pour évaluer ce métabolisme à l'échelle du projet d'aménagement « Terre d'avenir » à Sevrans, en intégrant la terre crue sous différentes formes : les briques en terre comprimée (BTC), le mortier de pose (MP) et les panneaux d'argile extrudée (PAE). La troisième partie présentera les résultats sur les volumes de flux nécessaires en comparaison d'un scénario constructif classique en béton. La conclusion, enfin, dessinera les perspectives pour le développement de la construction en terre crue.

La terre crue, solution pour construire une ville durable ?

La terre crue : une alternative plus écologique ?

Une grande part des impacts de la construction est due aux matériaux utilisés, et en particulier à l'utilisation massive du béton qui présente des impacts environnementaux importants. D'une part, sa production nécessite de l'eau à hauteur d'un dixième de la consommation mondiale d'eau à destination industrielle (Miller *et al.*, 2018). Sont aussi utilisés du sable et des gravillons, tous deux avec des risques d'épuisement dans certaines zones, dont l'extraction requiert de fortes dépenses énergétiques et impacte la biodiversité (Bendixen *et al.*, 2019). En France, 325,7 millions de tonnes de granulats naturels (non recyclés) ont été produites en 2019. Le ciment, autre composant majeur du béton, est, quant à lui, responsable de 7 % des émissions industrielles de gaz à effet de serre au niveau mondial (Cao *et al.*, 2020), en grande partie à cause de sa cuisson à très haute température. Enfin, la valorisation du béton issu de déconstruction concerne principalement une utilisation en infrastructure routière (Infociments, 2018). Sa réutilisation dans le bâtiment, à plus haute valeur ajoutée, reste très marginale.

La consommation de gypse (pour la fabrication de plaques de plâtre) représente des volumes beaucoup plus faibles avec une extraction de 3,4 millions de tonnes par an. Théoriquement recyclable à 100 %, le gypse ne l'est que partiellement dans les faits malgré les engagements de l'industrie : en France, sur les 350 000 tonnes de déchets de gypse produites par an, 107 000 tonnes ont été recyclées en 2019. L'objectif des 250 000 tonnes visées

¹ Cette recherche a pour origine le projet Cycle Terre, démarré en 2018. Pour plus d'informations, voir www.cycle-terre.eu/cycle-terre/le-projet/. Cet article n'a fait l'objet d'aucune présentation dans un colloque.

en 2020 par un engagement entre les industriels et l'État n'est donc pas atteint².

D'un point de vue environnemental, la terre crue semble une alternative intéressante par rapport à ces matériaux. Nous pouvons noter les avantages suivants, d'amont en aval :

- Dans une approche d'approvisionnement durable, la terre crue est intéressante par sa disponibilité locale, potentiellement issue de terres excavées dans des opérations existantes plutôt que de carrières dédiées, permettant également d'éviter la production de déchets ;
- Le processus de fabrication des éléments en terre crue demande peu d'énergie car ils ne nécessitent pas de cuisson et peuvent être séchés par aération naturelle. Durant la vie utile du bâtiment, ils demandent peu d'entretien et permettent une isolation satisfaisante ;
- Enfin, les matériaux en terre crue non stabilisés (sans ajout de ciment) présentent un potentiel de recyclage à 100 % en fin de vie par simple ajout d'eau, pouvant être réutilisés comme matériaux de construction ou rendus à la terre (Cycle Terre, 2021 ; Morel *et al.*, 2001).

La terre crue : de nombreux freins pour son utilisation

Cependant, bien que mobilisée via différentes techniques (pisé, bauge, BTC) dans des opérations privées et publiques en France, déjà bien documentées (Joffroy *et al.*, 2013), l'utilisation de la terre crue, en dehors de la rénovation du patrimoine en terre crue existant, reste marginale (Morel et Charef, 2019). Son utilisation est, en effet, limitée par plusieurs facteurs. Le développement de la construction en terre crue nécessite une approche globale du sujet tenant compte des dimensions :

- juridique : le Code de l'environnement (article L. 541-7-1) précise que : « Tout producteur ou, à défaut, tout détenteur de déchets est tenu de caractériser ses déchets et en particulier de déterminer s'il s'agit de déchets dangereux ». En conséquence, si les terres sont issues d'un site pollué, un test est nécessaire pour déterminer son classement et les orienter vers un site adapté. Ces sites obéissent eux-mêmes à une réglementation stricte. L'article L. 541-7-1 est complété par l'article L. 541-7-2, où il est précisé : « Sans préjudice du I du présent article, les personnes qui produisent, importent, exportent, traitent, collectent, transportent ou se livrent à des opérations de courtage ou de négoce des terres excavées et des

sédiments tiennent à disposition de l'autorité administrative toutes informations concernant : 1) La quantité, la nature, l'origine de ces terres excavées et sédiments et leur destination ; 2) Et, s'il y a lieu, le moyen de transport et le mode de traitement ou d'élimination envisagé ». Ces informations doivent être obligatoirement transmises depuis le 1^{er} janvier 2021 ;

- organisationnelle : dans un projet commun où la production de matière d'un acteur peut devenir la consommation d'un autre, une concordance entre les deux est indispensable. Or, chaque acteur a sa propre rationalité et ses contraintes internes et externes ; les besoins en fréquences et volumes (d'évacuation, d'un côté, d'approvisionnement, de l'autre) peuvent être très différents et ralentir la mise en œuvre du projet (Bastin et Verdeil, 2020). La présence d'un concepteur en chef peut s'avérer fort utile (Rekola *et al.*, 2012) ;
- politique avec la fiscalité et les normes : d'une part, les incitations fiscales pour l'utilisation de la terre crue n'existent pas encore. D'autre part, certaines normes limitent son extension, par exemple sur des territoires où il gèle, ce qui limite considérablement son développement (Morel et Charef, 2019) ;
- économique : l'utilisation de la terre est aujourd'hui coûteuse et il n'est pas envisageable d'industrialiser le processus en utilisant uniquement des terres à proximité du site du projet (Darko et Chan, 2017). L'émergence d'une filière s'avère donc indispensable, tout comme le développement des compétences permettant sa diffusion en architecture et dans le secteur de la construction.

Ainsi, le « village terre » dans l'Isère (Ville et Aménagement Durable, 2019) semble être la plus grande opération d'envergure en France métropolitaine avec la construction en 1982 de 65 logements sociaux mobilisant différentes techniques autour de la terre crue. Hors métropole, une seule initiative de grande envergure est également à noter³.

L'impact de la terre crue : des zones d'ombre dans son évaluation

Si la terre crue est l'objet d'un nombre croissant d'échanges scientifiques depuis les années 1980 (Guillaud, 1998) et de publications depuis 2003 (Morel et Charef,

² Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016. « Engagement pour la croissance verte relatif au recyclage des déchets de plâtre », www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ECV%20-%20PI%C3%A2tre.pdf.

³ Dans les années 1980, un programme conjoint entre CraTerre, la SIM et la direction de l'Équipement a vu la construction de plus de 20 000 logements à Mayotte avec le développement d'une filière locale s'appuyant sur les particularités sociales, économiques et géographiques de ce territoire insulaire (Joffroy, 2016).

2019), cette littérature académique se focalise principalement :

- sur les freins et les propriétés techniques de différents éléments (Morel *et al.*, 2021), comme nous l'avons signalé plus haut ;
- sur ce matériau mais indirectement. Dans une revue de littérature de 31 articles portant sur les flux et les stocks de matériaux de construction, la terre crue ne figure pas directement parmi les matériaux concernés, mais seulement avec l'argile sous forme de terre cuite (Augiseau et Barles, 2017) ;
- sur la partie amont du chantier (Barles, 2014 ; Augiseau, 2017). Pourtant, les déchets produits par les chantiers génèrent aussi des volumes de flux sortants évalués à 68 % des déchets à l'échelle nationale en 2017. Les terres excavées constituent une part importante de ces déchets. En 2014, par exemple, 50 % des déchets du BTP en Île-de-France, soit 15 millions de tonnes, étaient des terres excavées. Ces flux peuvent donc représenter des volumes importants à l'échelle d'un quartier en renouvellement urbain (Fernandez *et al.*, 2019). Cet enjeu est plus que jamais d'actualité : avec les travaux du Grand Paris Express, les déblais de terres inertes en Île-de-France devraient avoisiner 30 millions de tonnes par an (Cycle Terre, 2021). Et ces flux sont aujourd'hui sous-valorisés. Pour la majeure partie, ils sont enfouis dans des installations de stockage des déchets inertes (Vialleix *et al.*, 2020). Ils peuvent également être utilisés en remblai ou, au mieux, en aménagement paysager. Cependant, un véritable recyclage en tant que matériau de construction reste aujourd'hui anecdotique et le potentiel de celui-ci n'est pas étudié sous l'angle du métabolisme urbain ;
- sur des constructions très spécifiques à des échelles très limitées, comme l'échelle de maisons individuelles en bauge (Morel *et al.*, 2001) ou en briques de terre compressées (Asman *et al.*, 2020). Certains auteurs justifient cette limitation en estimant qu'elle ne permet pas de faire appel à un approvisionnement directement sur le site et en en réduisant l'intérêt écologique (Morel et Charef, 2019). Néanmoins, la possibilité d'approvisionnements de proximité, notamment en Île-de-France, encourage à poursuivre l'analyse. Certes, à l'échelle de métropoles comme le Grand Paris, la possibilité d'un approvisionnement de matériau sur site implique des besoins en matières dépassant largement les matériaux disponibles sur site (Fernandez *et al.*, 2018). Toutefois, au niveau régional, les volumes de terres excavées laissent présager de potentiels approvisionnements ;
- sur des échelles très vastes : les études de métabolisme urbain identifiées par la revue de littérature d'Augiseau et Barles (2017) se concentrent sur des échelles allant de la ville aux pays ou des échelles de grande taille spécifique (Hamard *et al.*, 2018).

À notre connaissance, peu de recherches scientifiques s'intéressent à l'impact de l'utilisation de la terre crue sur le métabolisme global d'un projet d'aménagement, c'est-à-dire aux avantages environnementaux que ce matériau peut représenter comparativement à un scénario constructif classique en béton. Encore faut-il trouver un projet d'aménagement adapté et évaluer le potentiel d'utilisation de la terre crue. C'est l'objet de la partie suivante.

Méthodologie : choix du terrain et évaluation des quantités de matières

Notre étude de terrain : la ZAC Sevrans Terre d'avenir

Il est intéressant d'étudier le potentiel impact d'intégration de la terre crue sur les flux de matières à l'échelle d'un chantier de renouvellement urbain de grande envergure. Parmi les projets potentiels, notre choix s'est porté sur celui de la ZAC Sevrans Terre d'avenir.

Située au sein de la ville de Sevrans (Seine-Saint-Denis), la zone d'aménagement concertée (ZAC) « Sevrans, Terre d'avenir-Centre-Ville Montceaux » conjugue renouvellement urbain et aménagement sur près de 120 ha, en lien avec l'arrivée du Grand Paris Express dont la ligne 16 desservira les deux gares RER de Sevrans-Livry et Sevrans-Beaudoctes. Ce projet vise l'émergence d'un nouveau quartier mixte comprenant 5 types de bâtiment⁴ ;

- les logements collectifs : la ZAC devrait compter environ 2 161 logements répartis dans des édifices de 2 à 7 étages. Dotés des surfaces à construire les plus importantes de la ZAC (144 800 m²), les logements représentent un fort potentiel d'apport de matériaux en terre crue via les murs intérieurs, les cloisons séparatives et distributives ;
- les bureaux seront répartis dans trois unités en rez-de-chaussée (RDC), une unité au 2^e étage et une unité majeure au 9^e étage de 6 091 m² ;
- les commerces seront en RDC pour une surface de 2 060 m² ;
- les équipements et les activités seront en RDC. Ayant peu d'information sur leur nature, nous les avons rassemblés en une seule catégorie (équipements) ;
- une école d'une surface de 6 132 m² est prévue sur 2 étages.

La ville de Sevrans et Grand Paris Aménagement ont souhaité conférer au projet une haute valeur écologique et environnementale. Par ailleurs, avec 11 partenaires et

⁴ Ces informations sont tirées du dossier de création de la ZAC datant de mars 2019. Elles sont susceptibles d'évoluer au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Tab. 1. Bilan de surface du projet « terre d’avenir ».

Type de bâtiment	2020-2024	2024-2028	2028-2032	Surface totale (m ²)
Logements collectifs	23 082	64 841	56 882	144 805
Bureaux	6 628	–	1 011	7 639
Commerces	761	1 299	–	2 060
Équipements et activités	2 443	2 667	1 157	7 871
Enseignement	–	–	6 132	6 132

l’Union européenne, ils ont porté le projet Cycle Terre destiné à mettre en place une filière de matériaux en terre crue. Le projet Terre d’avenir, qui se dessinait en même temps que Cycle Terre, a donc fourni un très bon cas d’étude pour évaluer l’impact réel du choix de la terre pour la construction sur le métabolisme de projet. Il faut cependant souligner que les terres excavées utilisées pour la fabrication ne sont pas issues du site même, mais d’un terrain d’aménagement proche – la ZAC Aérolians située à Tremblay en France (93).

Originalité de notre méthodologie

Pour évaluer le métabolisme à l’échelle du projet, nous utilisons la méthodologie proposée par Auez et Georgeault (2016) et Augiseau (2017) et formalisée par Fernandez *et al.* (2018) en tant que « méthode ascendante d’analyse des stocks dans une dimension prospective sur une échelle infra urbaine ». Cette méthodologie compare les stocks de matières intégrées dans les constructions avant et après le projet⁵. Ces quantités de matières sont issues de ratios établis dans le cadre du projet ANR ASURET qui caractérise les matières du bâti et des infrastructures sur la base des surfaces à construire et des typologies de bâtiments.

Pour autant, cette méthodologie n’intègre pas la terre crue dans son recensement car le bâti mobilisant la terre crue existe peu. L’originalité de notre méthodologie est donc de proposer une analyse du métabolisme à l’échelle du projet, en comparant les stocks de matières nécessaires selon différents scénarios constructifs, intégrant des scénarios de construction en terre crue.

Les quantités de matières nécessaires : premier scénario constructif en béton

Comme la plupart des projets immobiliers reposent sur le béton, nous souhaitons évaluer les quantités de matières

nécessaires pour la réalisation du projet Terre d’avenir avec ce scénario dit « classique ». Le scénario « tout béton » constituera donc notre scénario initial. Les surfaces à construire par type de bâtiments, réparties en 3 périodes selon le planning d’exécution de travaux prévisionnel, sont synthétisées dans le [tableau 1](#) ci-dessus.

Suivant Fernandez *et al.* (2018), nous utilisons alors les ratios fournis par l’étude ANR ASURET développés en [Annexe 1](#) (Michel *et al.*, 2012) pour évaluer les stocks de matières nécessaires aux bâtiments prévus dans la ZAC. Nous en déduisons alors les matériaux à approvisionner dans le [tableau 2](#) ci-dessus.

Le béton représente plus de 90 % du total des matériaux, ce qui est conforme aux études récentes de flux du BTP (Augiseau 2017 ; Fernandez *et al.* [2018]). En effet, il est utilisé pour la structure (murs porteurs et dalles) de la majorité des bâtiments, et notamment pour les bureaux et logements. Ces derniers sont le type de bâtiments le plus présent dans l’opération et influencent donc largement le type de matériaux observé. Dans cette étude, nous nous intéressons particulièrement au béton et au plâtre, dont les impacts environnementaux ont été décrits plus haut et qui peuvent être potentiellement remplacés par des éléments en terre crue.

Les quantités de matières nécessaires : l’intégration de la terre crue

Nous proposons de comparer ces résultats en termes de métabolisme en intégrant la terre crue comme une alternative au béton. Toutefois, cela nécessite au préalable de quantifier la quantité de terre crue mobilisable dans les différents bâtiments. Or, l’introduction de la terre crue peut se faire avec des éléments, des types d’application et des taux d’utilisation variés.

Concernant les éléments, nous estimons ici le potentiel d’intégration constructif suivant (précisions techniques en [Annexe 2](#)) :

⁵ Ici, le stock de matériaux disponible avant le projet est nul car celui-ci ne nécessite pas de déconstruction majeure préalable.

Tab. 2. Quantité de matériaux pour un scénario « classique ».

Produits	Logements	Bureaux	Commerces	Équipements	Enseignement	TOTAL
Béton	220 937	11 654	824	3 149	9 356	245 920
Métaux/Alliages (Acier)	5 823	307	156	656	247	7 189
Plâtre	4 126	218	4	9	175	4 530
Bois	3 200	169	0	0	136	3 505
Enrobés	2 462	130	0	260	104	2 956
Isolation	597	31	8	31	25	693
Verre	462	24	4	5	20	515

- les briques en terre compressée (BTC) : composées de terre crue et de sable⁶, elles seront produites dès 2022 dans la Fabrique Cycle Terre, l’usine de production de matériaux en terre installée à Sevran ;
- le mortier de pose (MP) : composé de terre crue et de sable, il sert à la pose des BTC et sera également produit à partir de 2022 ;
- les panneaux en argile extrudée (PAE) : composés de terre crue et de fibre végétale, leur production pourrait être lancée en 2023.

Tout comme le béton et les plaques de plâtre, la fabrication de ces éléments nécessite également un apport en eau qui s’évapore en grande partie durant le séchage. Cette perte n’est pas prise en compte dans notre étude. Concernant les modalités d’intégration de ces éléments dans les bâtiments, trois types d’application sont définis, qui ont été certifiés en 2021 par des Appréciations Techniques d’Expérimentation (ATEX) :

- 1^{re} application : BTC en remplissage d’ossature extérieure. Les capacités d’utilisation de BTC en mur porteur étant réduites, on considère ici une utilisation extérieure en comblement d’une ossature en béton, qui permet d’assurer une stabilité dans le temps et préserve les briques des remontées d’humidité. Les murs ainsi formés sont constitués à 80 % d’éléments constructifs en terre crue (BTC standard⁷ et mortier) et à 20 % de béton. Notons que cette utilisation impliquerait la pose d’un enduit protecteur à l’extérieur, également utilisé pour le béton ;
- 2^e application : BTC en cloison séparative. On considère ici une paroi intérieure « semi-porteuse »

⁶ Il s’agit ici de BTC non stabilisées, c’est-à-dire sans ajout d’un liant de type ciment.

⁷ 31,5 x 9,5 x ep. 15 cm – 8,7 kg – 1 935 kg/m³. « Ep. » signifie épaisseur.

utilisée, par exemple, entre des bureaux ou des logements et les parties communes. Le mur est constitué à 100 % d’éléments constructifs en terre crue, BTC standard⁸ et mortier ;

- 3^e application : panneaux en terre extrudée (PAE) en cloison distributive. Les panneaux en argile extrudée⁹ peuvent être utilisés en cloisonnement intérieur. Le mur est composé à 100 % d’éléments constructifs en terre crue, intégralement en PAE. Les applications possibles de la terre crue sont synthétisées dans le [tableau 3](#) ci-dessous.

Ces applications peuvent être déployées à différentes échelles sur l’ensemble de la ZAC. Pour les estimer, nous considérons dans le [tableau 4](#) ci-dessous trois scénarios dont la plausibilité a été vérifiée au sein du consortium de Cycle Terre, notamment CRATerre, le Centre international de la construction en terre¹⁰. Les hypothèses communes aux 3 scénarios sont les suivantes :

- la hauteur des étages est de 2,9 m avec une hauteur sous plafond de 2,7 m ;
- 2 161 logements dans la ZAC (nombre donné par la programmation) ;
- 20 bureaux par étage de bureaux ;
- 20 salles ou locaux par étage dans l’école.

Ces scénarios qualifient 3 niveaux d’ambition :

- 1/. Le scénario minimum utilise partiellement de la terre crue pour les cloisons séparatives et distributives ;

⁸ 31,5 x 9,5 x ep. 15 cm – 8,7 kg – 1 935 kg/m³.

⁹ 120 x 62,5 x ep. 2 cm – 20 kg – 1 333 kg/m³.

¹⁰ Ces niveaux d’intégration sont réalisables techniquement – le facteur limitant à ce jour se trouve dans la capacité de fabrication des éléments en terre crue, la filière étant encore en développement.

Tab. 3. Synthèse des applications d'éléments en terre crue.

Application	Éléments Cycle Terre utilisés	Composition mur ou cloison	Éléments « classiques » remplacés
1. Remplissage d'ossature extérieure	– Briques en terre compressée standard 31,5 × 9,5 x ep. 15 cm 8,7 kg – 1 900 kg/m ³ – Mortier de pose 1 800 kg/m ³	20 % béton 64 % BTC 16 % MP Soit 80 % d'éléments en terre crue	Structure 100 % béton d'épaisseur 18 cm
2. Cloison séparative	– Briques en terre compressée standard 31,5 × 9,5 x ep. 15 cm 8,7 kg 1 900 kg/m ³ – Mortier de pose 1 800 kg/m ³	80 % BTC 20 % mortier	Cloison 100 % béton épaisseur 16 cm
3. Cloison distributive	– Panneaux en argile extrudée 120 x 2,5 x ep. 2 cm 20 kg – 1 333 kg/m ³	100 % PAE en double pose	Plaque de plâtre type BA13 en double pose

Tab. 4. Détail des scénarios constructifs mobilisant des éléments en terre crue.

Scénario Application	Scénario optimal	Scénario moyen	Scénario minimum
1. BTC en comblement d'ossature extérieure	Tous murs extérieurs. Tous les bâtiments.	Tous murs extérieurs. 50 % des bâtiments.	Non appliqué
2. BTC en cloison séparative	1 paroi de la longueur du bâtiment + 1 paroi de la largeur du bâtiment. Tous les bâtiments.	1 paroi longueur + 1 paroi largeur, 50 % des bâtiments	1 paroi longueur + 1 paroi largeur, 50 % des logements
3. PAE en cloison distributive	Logement : 24 m de cloison par logement. Bureaux : 7 m par bureau. Enseignement : 10 m par salle ou local	– 18 m de cloison par logement – 4 m par bureau – 5 m par salle	– 12 m de cloison par logement – 4 m par bureaux, 1 bureau sur 2 – 5 m par salle, 1 salle sur 2

- 2/. Le scénario moyen ajoute l'utilisation de terre crue pour l'ossature extérieure de certains bâtiments et augmente l'utilisation de la terre crue pour le cloisonnement ;
- 3/. Le scénario optimal généralise l'utilisation de terre crue en ossature extérieure et pour la plupart des parois intérieures.

Sur la base des hypothèses précédentes, l'apport en éléments constructifs en terre crue est estimé pour les différents scénarios dans le [tableau 5](#) ci-dessous.

La quantification de la terre crue mobilisable dans les différents bâtiments du projet va alors nous permettre de calculer le métabolisme du chantier et

de le comparer au métabolisme du scénario classique en béton.

Résultats : substitution de la terre au béton et impact sur le métabolisme

La terre crue : une alternative de construction décevante ?

Nous évaluons ici les quantités de matières nécessaires au projet selon les différents scénarios constructifs : classique en béton ou selon les différentes modalités d'intégration des éléments en terre crue. Le bilan d'éléments

Tab. 5. Estimation des quantités d'éléments en terre crue par type de bâtiment et par scénario (en tonnes).

Type de bâtiment	Apport en BTC + mortier			PAE		
	Scénario optimal	Scénario moyen	Scénario minimum	Scénario optimal	Scénario moyen	Scénario minimum
Logements	29 702	14 851	3 394	7 468	5 601	3 734
Bureaux	795	398	0	282	161	81
Commerces	452	226	0	0	0	0
Enseignement	413	207	0	58	29	14
Équipements & Activités	1 362	681	0	0	0	0
TOTAL	32 726	16 363	3 394	7 808	5 791	3 829

Tab. 6. Quantité d'éléments constructifs selon les scénarios (en tonnes).

	Sans Cycle Terre		Avec Cycle Terre					
	Sans Cycle Terre	%	Scénario optimal	%	Scénario moyen	%	Scénario minimum	%
Béton	245 920	94 %	200 009	79 %	222 964	86 %	241 705	91 %
Métaux	7 189	3 %	7 189	3 %	7 189	3 %	7 189	3 %
Plâtre	4 530	2 %	1 846	1 %	2 539	1 %	3 214	1 %
Verre	515	0 %	515	0 %	515	0 %	515	0 %
Laines minérales	693	0 %	693	0 %	693	0 %	693	0 %
Bois	3 505	1 %	3 505	1 %	3 505	1 %	3 505	1 %
Autre	338	0 %	338	0 %	338	0 %	338	0 %
BTC + MP	0	0 %	32 726	13 %	16 363	6 %	3 394	1 %
PAE	0	0 %	7 808	3 %	5 791	2 %	3 829	1 %
TOTAL	262 689	100 %	254 628	100 %	259 897	100 %	264 382	100 %

constructifs pour chaque scénario est obtenu à partir du scénario de référence, auquel on ajoute la quantité d'éléments en terre crue (BTC, MEC et PAE) intégrés et on retranche les quantités de béton et de plâtre substituées par ces derniers. Les quantités de matières des différents scénarios sont indiquées dans le [tableau 6](#) ci-dessus.

On observe que l'utilisation de la terre crue ne fait que faiblement varier la quantité totale de matériaux constructifs utilisés par rapport à un scénario classique où le béton représente 94 % de l'ensemble. Légèrement plus faible pour les scénarios optimaux (de 94 % à 79 %)

et moyen (de 94 % à 86 %), le béton reste largement dominant dans tous les scénarios, comme indiqué en gras dans le [tableau 6](#). En effet, la terre crue peut remplacer le béton ou le plâtre en cloison séparative ou en comblement d'ossature, mais elle ne peut pas être utilisée aujourd'hui dans les éléments structurels, comme les murs porteurs, les planchers, les poutres, etc.

Si la terre crue ne change donc pas radicalement la consommation totale de matières des chantiers, elle permet cependant d'économiser des quantités non négligeables de béton et de plâtre dans les scénarios les plus ambitieux.

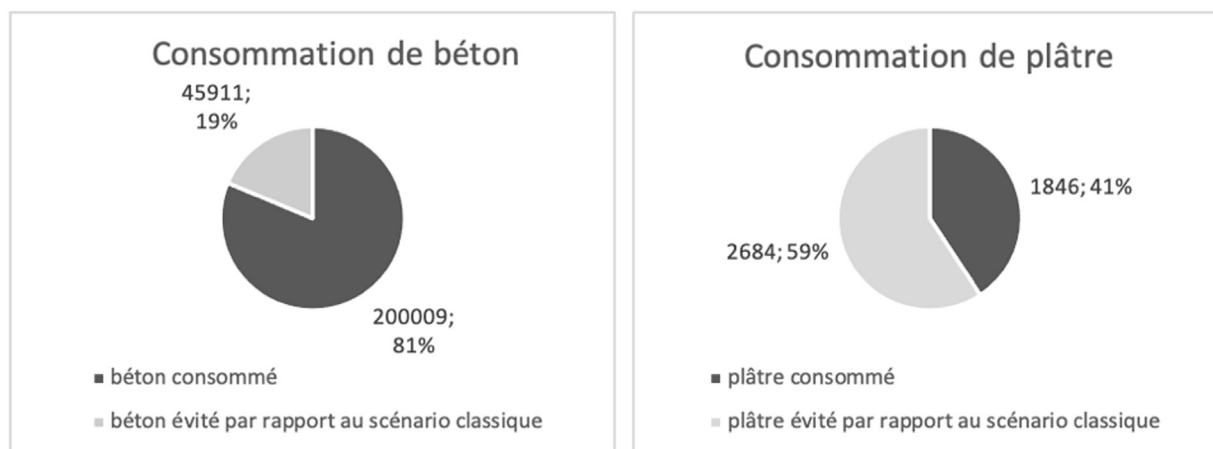


Fig. 1. Béton et plâtre remplacés, scénario optimal d'intégration de terre crue.

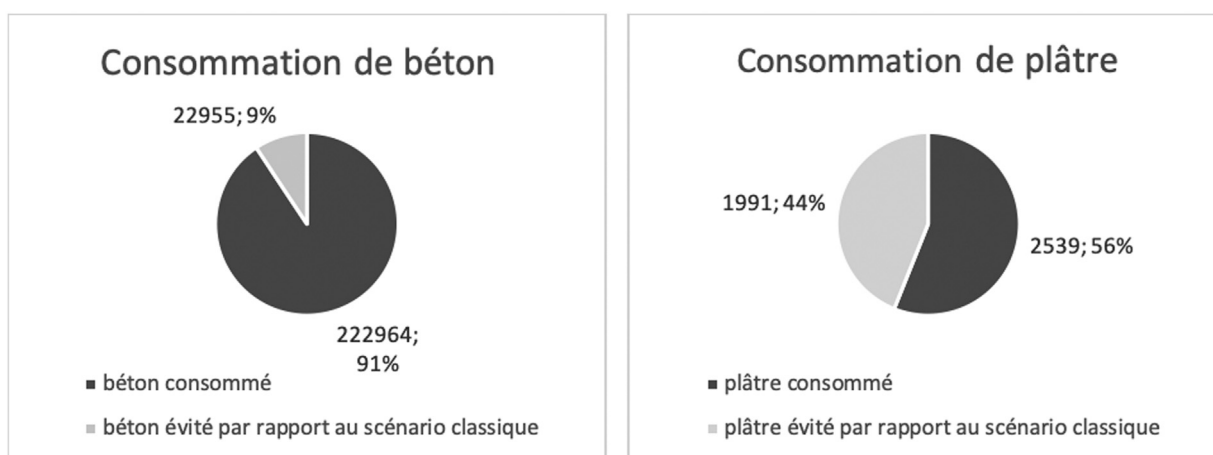


Fig. 2. Béton et plâtre remplacés, scénario moyen d'intégration de terre crue.

Des économies de béton et de plâtre potentiellement non négligeables

Les gains sur les quantités de béton et de plâtre consommés sont présentés dans les figures 1 et 2 ci-dessus et dans la figure 3 ci-dessous.

En remplissage d'ossature et cloisonnement séparatif, les apports en BTC peuvent ainsi remplacer de 4 214 tonnes à 45 911 tonnes de béton, soit 2 à 19 % du béton total dans un scénario de construction classique. En cloisonnement distributif, les apports en BTC et en PAE peuvent remplacer de 1 316 tonnes à 2 684 tonnes de plâtre, soit 29 à 59 % du plâtre total dans un scénario de construction classique.

Cette alternative n'est donc pas négligeable. Toutefois, la fabrication des éléments en terre crue, tout comme celle du béton, nécessite des approvisionnements en matières qu'il convient également de prendre en compte pour disposer d'une vision plus précise des flux liés aux chantiers ainsi que des prélèvements nécessaires sur les ressources naturelles.

Perspectives de recherche : les prélèvements sur les ressources selon les différents scénarios constructifs

Afin de préciser les besoins en approvisionnement, mais aussi l'ampleur des prélèvements sur les ressources, nous détaillons, dans les tableaux 7 et 8, les matériaux contenus dans les éléments constructifs en terre crue ainsi que dans le plâtre et le béton selon la composition suivante¹¹ ;

- les BTC et le MP : 65 % de terre et 35 % de sable ;
- les PAE : 90 % de terre et 10 % de fibre végétale ;
- le béton : on considère ici 12 % de ciment et 81 % de granulats (gravillons + sable) ;
- les plaques de plâtre : on considère ici 100 % de gypse¹².

¹¹ L'eau n'est pas prise en compte dans notre analyse.

¹² Le carton et les ajouts constituent 4 à 8 % d'une plaque de plâtre classique. Ils sont ignorés dans notre analyse.

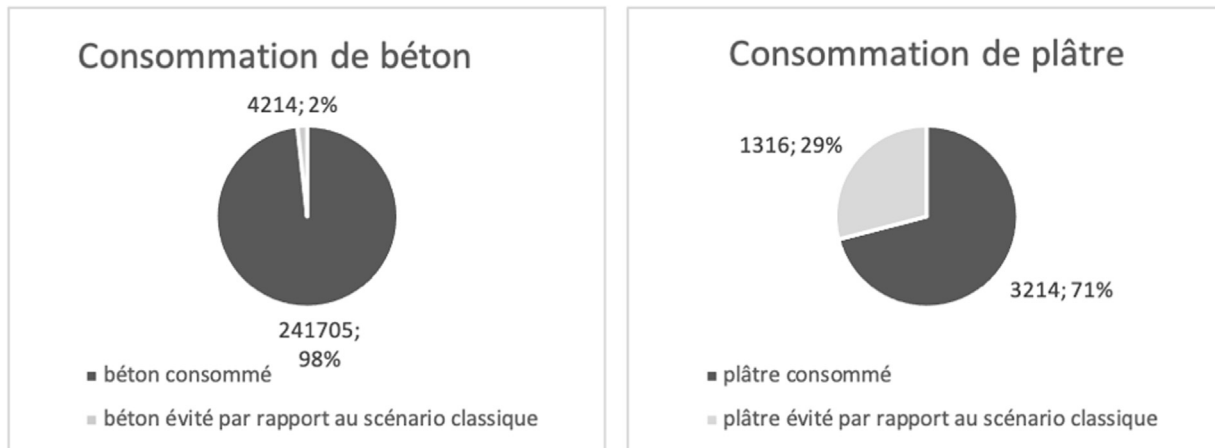


Fig. 3. Béton et plâtre remplacés, scénario minimum d'intégration de terre crue.

Tab. 7. Détail des matières selon les scénarios constructifs (en tonnes).

	Sans Cycle Terre	Cycle Terre		
		Scénario optimal	Scénario moyen	Scénario minimum
Ciment	29 510	24 001	26 756	29 005
Sable et granulats (béton)	199 195	162 007	180 601	19 5781
Terre	0	28 299	15 848	5 653
Sable (BTC)	0	11 454	5 727	1 188
Fibres Végétales	0	781	579	383
Plâtre	4 530	1 846	2 539	3 214

Tab. 8. Total de l'approvisionnement en sable et granulats par scénario constructif (en tonnes).

	Sans Cycle Terre	Cycle Terre		
		Scénario optimal	Scénario moyen	Scénario minimum
Tout sable et granulats	199 195	173 461	186 328	196 969

L'approvisionnement en sable est une des causes de l'impact environnemental élevé du béton, comme nous l'avons signalé. Si les éléments en terre crue nécessitent également du sable, la proportion est plus faible et permet de diminuer la consommation de sable de 13 % pour le scénario optimal. Les éléments Cycle Terre prévoient l'utilisation exclusive de sable local, extrait en Île-de-France, ce qui devrait améliorer le bilan logistique. Pour aller plus loin dans cette démarche d'approvisionnement durable, il serait intéressant d'explorer la possibilité

d'utiliser du sable ou des graviers issus du recyclage de béton de déconstruction. En effet, celui-ci n'est pas utilisé aujourd'hui pour la fabrication de béton, hormis dans de rares expérimentations.

Enfin, au regard des volumes de terre nécessaires pour le projet Sevrans Terre d'avenir comme pour le développement d'autres projets en terre crue, il convient de soutenir l'émergence d'une filière, la fabrique Cycle Terre s'étant fixé un objectif de traitement de 8 000 tonnes par an en phase démonstrateur.

Conclusion

Dans le cadre du projet Cycle Terre, une méthodologie spécifique a été développée pour estimer l'impact de l'apport d'éléments constructifs en terre crue dans une opération d'aménagement, selon différents scénarios. Ce travail permet d'enrichir les connaissances sur le métabolisme urbain à l'échelle d'un chantier qui, jusqu'à maintenant, ne proposaient pas de références pour la terre crue.

Notre étude du cas de la ZAC Sevrans Terre d'avenir montre que les apports possibles en terre crue, aujourd'hui, ne permettent pas un changement radical du métabolisme, le béton restant la matière dominante dans tous les scénarios (de 94 à 79 %). Les scénarios constructifs optimal et moyen présentent toutefois un intérêt pour substituer aux éléments traditionnels des éléments constructifs : jusqu'à 19 % du béton et 59 % du plâtre utilisés dans un scénario de construction classique peuvent ainsi être remplacés par des BTC et PAE.

Il serait également intéressant d'étudier si l'approvisionnement local de la terre et la moindre consommation d'énergie de la production de PAE compensent ce différentiel en termes d'impacts environnementaux. L'analyse des impacts logistiques associés à ces différents scénarios va permettre de confirmer l'intérêt de mettre en œuvre les différents scénarios et ouvrira une réflexion plus approfondie sur les enjeux d'approvisionnement en terre crue.

La diffusion de la construction en terre nécessite par ailleurs le développement d'une approche globale notamment par des évolutions réglementaires soutenant l'ensemble de la filière. Incitant à considérer l'impact environnemental du bâtiment dans sa globalité, de sa phase de construction à sa phase d'exploitation et de démolition, la réglementation environnementale (RE 2020) peut amener les constructeurs à choisir des matériaux à faible bilan carbone. Le projet National Terre, lancé par l'État en 2020, montre également l'importance de la structuration de la filière dans l'atteinte des 70 % de valorisation des déchets du BTP, un objectif fixé par la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte en 2015¹³. Les professionnels ont ainsi commencé à s'organiser au sein de la Confédération de la Construction en Terre Crue (CCTC) en publiant le guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue. À l'échelle européenne, les professionnels se sont aussi regroupés, ce qui a permis de produire des référentiels de certification communs concernant les compétences professionnelles en techni-

ques de construction en terre. La nombreuse main-d'œuvre nécessaire sur les chantiers en terre crue doit aujourd'hui être valorisée au regard des économies faites sur l'énergie grise¹⁴ et d'usage du bâtiment, de plus en plus élevées dans un contexte d'augmentation du coût de l'énergie. La sensibilisation doit donc se poursuivre, principalement à l'attention des décideurs et des maîtres d'ouvrage.

Remerciements

Nous tenons à remercier monsieur David Rosset pour son apport important dans cet article.

Références

- Asman N.S.A., Bolong N., Mirasa A.K., Asrah H., 2020. Life cycle assessment of interlocking compressed earth brick and conventional fired clay brick for residential house, *Journal of Physics: Conference Series*, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/4/042012>.
- Augiseau V., 2017. *La dimension matérielle de l'urbanisation. Flux et stocks de matériaux de construction en Ile-de-France*. Thèse de doctorat, Université Paris 1.
- Augiseau V., 2019. Utiliser les ressources secondaires de matériaux de construction : contraintes et pistes d'action pour des politiques territoriales, *Flux*, 116-117, 2, 26-41, <https://doi.org/10.3917/flux1.116.0026>.
- Augiseau V., Barles S., 2017. Studying construction materials flows and stock: a review, *Resources, Conservation and Recycling*, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.002>.
- Aurez V., Georgeault L., 2016. *Économie circulaire. Système économique et finitude des ressources*, Louvain-la-Neuve, Deboeck supérieur.
- Barles S., 2008. Comprendre et maîtriser le métabolisme urbain et l'empreinte environnementale des villes, *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 52, 4, 21-26.
- Barles S., 2010. Écologie territoriale, in Merlin P., Choay F., *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, Paris, Presses universitaires de France, 276-277.
- Barles S., 2014. L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières, *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 5, 1, <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.10090>.
- Bastin A., Verdeil E., 2020. L'émergence d'une politique publique des terres en Île-de-France. Réflexions à partir du cas de Cycle terre, in Landau B., Diab Y., *La terre dans tous ses états*, Paris, Presse des Ponts, 69-78, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-03131315>.
- Bendixen M., Best J., Hackney C., Iversen L.L., 2019. Time is running out for sand, *Nature*, 571, 7763, 29-31, <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02042-4>.
- Bognon S., Barles S., Billen G., Garnier J., 2018. Approvisionnement alimentaire parisien du XVIII^e au XXI^e siècle : les flux et leur gouvernance. Récit d'une trajectoire socioécologique, *Natures*

¹³ Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, *Journal officiel*, 18 août 2015, 189.

¹⁴ L'énergie grise prend en compte l'énergie utilisée pour construire et pour démolir un bâtiment.

- Sciences Sociétés*, 26, 1, 17-32, <https://doi.org/10.1051/nss/2018017>.
- Bringezu S., Ramaswami A., Schandl H., O'Brien M., Pelton R., Acquatella J., Ayuk E., Chiu A., Flanegin R., Fry J. *et al.*, 2017. *Assessing global resource use. A systems approach to resource efficiency and pollution reduction. A report by the international resource panel*, Nairobi, United Nations Environment Programme (UNEP), www.resourcepanel.org/reports/assessing-global-resource-use.
- Cao Z., Myers R.J., Lupton R.C., Duan H., Sacchi R., Zhou N., Miller T.R., Cullen J.M., Ge Q., Liu G., 2020. The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle, *Nature Communications*, 11, 3777, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>.
- Cycle Terre, 2021. *Guide de conception et de construction*, Cycle Terre, www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2021/06/CycleT_Guide-de-conception-et-construction_COMPLET_BD.pdf.
- Darko A., Chan A.P.C., 2017. Review of barriers to green building adoption, *Sustainable Development*, 25, 3, 167-179, <https://doi.org/10.1002/sd.1651>.
- Fernandez M., Blanquart C., Niérat P., Verdeil E., 2019. Renouvellement urbain et optimisation du métabolisme : une équation complexe, *Flux*, 116-117, 2-3, 58-73, <https://doi.org/10.3917/flux1.116.0058>.
- Fernandez M., Blanquart C., Verdeil E., 2018. La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial, *Vertigo – la revue électronique en sciences de l'environnement*, 18, 3, <https://doi.org/10.4000/vertigo.23302>.
- Guillaud H., 1998. Tradition et modernité des cultures constructives de l'architecture de terre : panorama mondial et enjeux actuels sur la recherche, la formation, la documentation et la normalisation, in Storelli F. (Ed.), *Habitat e Architettura di terra. Le potenzialità delle tradizioni costruttive*, Roma, Gangemi, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01806210>.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>.
- Hamard E., Lemercier B., Cazacliu B., Razakamanantsoa A., Morel J.-C., 2018. A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction – application to cob in Brittany, *Construction and Building Materials*, 170, 485-497, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097>.
- IEA (International Energy Agency), UNEP (United Nations Environment Programme), 2019. *2019 global status report for buildings and construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*, IEA/UNEP, <https://globalabc.org/sites/default/files/2020-03/GSR2019.pdf>.
- Infociments, 2018. *Le béton, un matériau recyclable... et recyclé, Infociments*, <https://www.infociments.fr/favoriser-leconomie-circulaire/le-beton-un-materiau-recyclable-et-recycle>.
- Joffroy T., 2016. Les architectures de terre crue : des origines à nos jours, in Jacquet H., *Savoir & faire la terre*, Arles, Actes Sud, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01861816>.
- Joffroy T., Guillaud H., Le Tiec J.-M., 2013. *Architectures contemporaines en terre crue : sur les traces de Hassan Fathy, Earthen Architecture in today's world: proceedings of the UNESCO International Colloquium on the Conservation of World Heritage Earthen Architecture, 17-18 December 2012*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00947949>.
- Michel P., Monfort D., Serrand M., Jayr E., Papinot P., Rouvreau L., 2012. *Projet ANR ASURET : analyse de flux de matière du secteur de la construction à l'échelle de l'ouvrage et du territoire* (version disponible sur ResearchGate), <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1982.8243>.
- Miller S.A., Horvath A., Monteiro P.J.M., 2018. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide, *Nature Sustainability*, 1, 69-76, <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>.
- Morel J.-C., Mesbah A., Oggero M., Walker P., 2001. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction, *Building and Environment*, 36, 10, 1119-1126, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8).
- Morel J.-C., Charef R., 2019. What are the barriers affecting the use of earth as a modern construction material in the context of circular economy?, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012053>.
- Morel J.-C., Charef R., Hamard E., Fabbri A., Beckett C., Bui Q. B., 2021. Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome, *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*, 376, 1834, <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>.
- Rekola M., Mäkeläinen T., Häkkinen T., 2012. The role of design management in the sustainable building process, *Architectural Engineering and Design Management*, 8, 2, 78-89, <https://doi.org/10.1080/17452007.2012.659503>.
- Vialleix M., Bastin A., Augiseau V., 2020. *Vers un modèle circulaire pour les matériaux de construction*, L'Institut Paris Région, <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/vers-un-modele-circulaire-pour-les-materiaux-de-construction>.
- Ville et Aménagement Durable, 2019. *Le Domaine de la Terre, retour d'expérience*, Ville et Aménagement Durable, IFSTTAR, www.ville-amenagement-durable.org/Le-Domaine-de-la-Terre.

Annexe 1. Ratios de matières issus de l'étude ANR ASURET en kg/m².

Type de bâtiment	Béton	Métaux/ Alliages	Isolation	Verre	Plâtre	Enrobés	Terre cuite	Bois
Logements individuels	760	3,27	7	2,1	30	0	103	102,38
Logements Collectifs	1526	40,21	4	3,19	28	17	0	22,1
Commerces	400	75,95	4	2	2	0	0	0
Industriel	400	83,39	4	0,6	1	33	0	0
Bureaux	1 526	40,21	4	3,19	28	17	0	22,1
Enseignement	1 526	40,21	4	3,19	28	17	0	22,1
Équipements	400	83,39	4	0,6	1	33	0	0

Annexe 2. Gamme de produits prévisionnels de la fabrique.

Éléments appliqués	L (cm)	e (cm)	h (cm)	Poids/ unité	M ³ /unité	m ² /unité	unités pour 1 m ²	Masse vol.
BTC Standard (31,5 × 15 × 9,5cm)	32	15	9,5	8,7	0,004	0,030	33,4	1 936
BTC Standard parement (31,5 x 9,5 x ep. 10)	32	10	9,5	5,8	0,003	0,030	33,4	1 935
BTC Classique carrée (31,5 x 15 x 9,5 cm)	22	22	9,5	8,7	0,005	0,021	47,8	1 901
BTC Classique (31,5 x 15 x 9,5 cm)	30	14	9,5	7,6	0,004	0,028	35,7	1 934
BTC Bloc accessoire (31,5 x 20 x 9,5 cm)	30	14	9,5	7,6	0,004	0,028	35,7	1 934
BTC Bloc chaînage	30	20	9,5	8,7	0,006	0,028	35,7	1 550
Panneaux extrudé (100 × 2,2 × 62,5)	120	2	61	20,0	0,015	0,726	1,38	1 377
Mortier (Sac 25 Kg)	52	20	76	25,0	0,079	0,395	2,5	316
Mortier (Big bag 1 000 Kg)	150	150	100	1 000,0	2,250	1,500	0,7	444

Citation de l'article : Blanquart C., Moesch E., Zeroual T., 2024. La terre crue comme alternative au béton ? Une évaluation de son impact sur le métabolisme des chantiers de BTP. *Nat. Sci. Soc.*, <https://doi.org/10.1051/nss/2024033>