

**Mémoire de fin d'études: Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture?
Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive**

Auteur : Maton, Inès

Promoteur(s) : Trachte, Sophie; Laurent, Francois

Faculté : Faculté d'Architecture

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23005>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Université de Liège, Faculté d'Architecture

Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture?

Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive.

Travail de fin d'étude présenté par Inès Maton en vue de l'obtention du grade de master en Architecture

Sous la direction de Sophie Trachte et François Laurent

Année académique 2024-2025

Image 1 : Amaco, (s.d.). Les graminées : du brin d'herbe au bambou [Photographie]. Amaco. <https://amaco.org/les-graminees-du-brin-d-herbe-au-bambou/>

Image 2 : Bécheret, P. (s. d.). Workshop matériau terre [Image]. Source. <https://www.pierre-becheret.com/portfolio/workshop-matériau-terre/>

Image 3 : Treical, S. (2022). Un immeuble mixte à la matérialité brute et soignée à Caluire-et-Cuire [Photographie]. AMC-Archi. <https://www.amc-archi.com/photos/un-immeuble-mixte-a-la-materialite-brute-et-soignee-par-gilles-perraudin-a-caluire-et-cuire.80771/photo-22693-128372549x1158-1>



Université de Liège, Faculté d'Architecture

Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture?

Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive.

Travail de fin d'étude présenté par Inès Maton en vue de l'obtention du grade de master en Architecture

Sous la direction de Sophie Trachte et François Laurent

Année académique 2024-2025

Remerciements :

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice, Sophie Trachte, ainsi qu'à mon co-promoteur, François Laurent, pour leur précieuse guidance, leur soutien et leurs conseils tout au long de l'élaboration de ce TFE.

Je souhaite adresser un immense merci à mon papa, pour sa coopération indéfectible, sa confiance et son aide précieuse à chaque étape de mon parcours académique.

Un énorme merci à ma maman, pour sa motivation inébranlable et son réconfort moral.

Je remercie chaleureusement mon frère pour sa relecture attentive et ses précieuses corrections orthographiques.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers tout mon entourage, leurs encouragements et leur motivation tout au long de mon cursus.

Enfin, je tiens à adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, participé à la réalisation de ce travail. Votre contribution a été d'une grande aide pour mener à bien ce projet.

Sommaire

Table des matières

Abstract	6
Intelligences artificielles :	7
Avant-propos	8
Introduction	9
L'état de l'art	12
Méthodologie	15
Partie I : De l'extraction aux propriétés	17
Chapitre 1 : Le bambou : un matériau durable aux multiples atouts	19
Introduction	20
Cycle de vie	22
Services écosystémiques	23
Propriétés structurales en tant que matériau de construction	25
Mise en œuvre et assemblages	25
Propriétés physiques du bâtiment	31
Normes et réglementations	31
Conclusion	32
Chapitre 2 : La terre crue : une disponibilité mondiale	33
Introduction	34
Cycle de vie	36
Services écosystémiques	37
Propriétés structurales en tant que matériau de construction	38
Techniques de mise en œuvre	40
Propriétés physiques du bâtiment	42
Normes et réglementations	43
Conclusion	44
Chapitre 3 : La pierre massive : un matériau brut au service de l'architecture durable	45
Introduction	46
Cycle de vie	47
Services écosystémiques	47
Propriétés structurales en tant que matériau de construction	48
Techniques de mise en œuvre :	49

Propriétés physiques du bâtiment _____	53
Normes et réglementations _____	54
Conclusion _____	54
Chapitre 4 : Conclusion de la partie I _____	55
Partie II : Du matériau à l'architecture _____	57
Chapitre 1 : Construire avec le bambou _____	59
Introduction _____	60
NorthEast bamboo pavilion for Surajkund Craft Fair – AtArchitecture _____	61
Anandaloy – Anna Heringer _____	66
Desi Training Center – Anna Heringer _____	71
Contemplation Bamboo Pavillon – Simon Vélez _____	76
Bamboo Sports Hall for Panyaden International School – Chiangmai Life Construction _____	81
Tableau synthèse des projets en bambou _____	86
Projets vernaculaires bambou _____	88
Bahay Kubo (hutte nipa) _____	88
Maisons traditionnelles flottantes en Birmanie _____	89
Tableau synthèse des projets vernaculaire en bambou _____	90
Chapitre 2 : Construire avec la terre crue _____	91
Introduction _____	92
Meti Handmade School – Anna Heringer _____	93
Gando Primary School – Francis Kéré _____	98
Haus Rauch – Roger Boltshauser, Martin Rauch _____	103
Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma – Atelier Régis Rouldil _____	108
CEM Kamanar – DAWOffice _____	113
Tableau de synthèse des projets en terre crue _____	118
Projets vernaculaires terre crue _____	119
Les immeubles des villes de Sanaa au Yémen _____	119
La ville de Ghadamès en Libye _____	120
Tableau synthèse des projets vernaculaires en terre crue _____	121
Chapitre 3 : Construire avec la pierre massive _____	122
Introduction _____	123
Immeuble mixte 1600m2 – L'atelier Architecture Perraudin _____	124
68 logements collectifs en pierre massive 15 500m2 – Gilles Perraudin & l'Atelier Archiplein _____	129
Projet Coulouvrenière – Atelier Archiplein/ FDMP réalisation _____	134

Groupe scolaire à Opio – Tessier Portal _____	139
Le chai Delas,Tain l'hermitage – Carl Fredrik Swenstedt Architectes _____	144
Tableau synthèse des projets en pierre massive _____	149
Projet vernaculaire pierre massive _____	151
Masia, maison rurale catalane _____	151
Le mas arlésien, habitat typique de Provence _____	152
Tableau synthèse des projets vernaculaires en pierre massive _____	153
Chapitre 4 : Conclusion de la partie II _____	154
Partie III : Matériaux et construction : une discussion croisée _____	156
Chapitre 1 : Comparaison des propriétés des matériaux _____	158
Chapitre 2 : Analyse des usages spécifiques en construction et les synergies entre les matériaux _____	160
Exemple architectural utilisant des synergies entre matériaux : _____	164
Chapitre 3 : Comparaison structurelle des matériaux _____	169
Quantité de matériaux mobilisées _____	170
Estimation des portées en fonction des matériaux _____	171
Chapitre 4 : Ces matériaux en application en Belgique _____	172
Chapitre 5 : Circularité et impact environnemental _____	174
Tableau circularité _____	175
Utilisation de l'outil TOTEM _____	176
Chapitre 6 : Conclusion de la partie III _____	181
Conclusion finale _____	183
Perspectives d'évolution du sujet _____	186
Liste des figures _____	187
Liste des crédits _____	192
Bibliographie _____	194

Abstract

Dans un contexte de transition écologique et de quête de durabilité, les matériaux naturels biosourcés et géosourcés sont au centre des réflexions architecturales. Ce TFE explore le potentiel de trois matériaux distincts : le bambou ; la terre crue ; la pierre massive.

La première partie du travail analyse les caractéristiques de ces matériaux sous l'angle de leur composition, de leurs performances structurelles et thermiques, ainsi que de leur technique d'utilisation en construction. La seconde partie s'appuie sur l'étude de projets architecturaux ayant intégré ces matériaux, afin d'évaluer leur mise en œuvre, les enjeux, les techniques utilisées et leur capacité d'adaptation aux contextes. Enfin, une discussion croisée entre les différentes données collectées met en lumière l'intelligence constructive qu'apporte les architectes en utilisant ces matériaux et explore sa potentielle possibilité d'usage dans nos régions.

L'objectif de ce TFE est d'apporter une réflexion approfondie sur la manière dont ces matériaux peuvent répondre aux défis actuels du domaine de la construction. Il met en lumière leur contribution à la réactivation de l'intelligence constructive, en conciliant esthétique, résilience et impact écologique minimal. Ces matériaux se présentent ainsi comme de réelles alternatives pour nous les architectes.

Intelligences artificielles :

Dans le cadre de mon TFE, l'intelligence artificielle, notamment ChatGPT, a été utilisée pour rehausser la qualité des écrits, certaines phrases ayant été reformulées pour produire des formulations plus fluides, tandis que Google Translate a été utilisé pour traduire des documents et textes en langues étrangères. Cette combinaison d'outils m'a permis d'optimiser la présentation de mes concepts et de rendre mon travail plus accessible et attrayant.

Avant-propos

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il me semble essentiel de retracer l'origine de mon intérêt pour la construction durable.

Tout au long de mon parcours universitaire, j'ai été sensibilisé à l'impact croissant de la construction sur l'environnement et à la nécessité d'adopter des pratiques plus responsables. Des cours nous ont présenté une vision alternative de l'architecture, mettant en avant des méthodes et des matériaux plus durables. Cette prise de conscience a éveillé en moi un intérêt grandissant pour ces enjeux.

Lors du cours d'état d'avancement, mon intérêt s'est amplifié. J'ai ressenti le besoin d'approfondir mes connaissances sur des architectures éco-responsables et les matériaux qui y sont mis en œuvre. Cette passion naissante s'est transformée en une véritable détermination à explorer ce domaine.

C'est ainsi que ma fascination pour les nouvelles pratiques de construction a pris forme. J'ai eu la chance d'être soutenu dans cette démarche par Mme Trachte, qui est devenue ma promotrice et m'a encouragé dans mon choix de sujet de TFE.

Les recherches que j'ai menées m'ont permis de mieux comprendre les enjeux de la construction dans notre société et m'ont ouvert les yeux sur de nouvelles façons de concevoir et de construire. J'ai réalisé que le rôle de l'architecte est de guider vers des pratiques plus durables, contribuant ainsi à façonner un nouvel avenir pour le secteur du bâtiment, en étroite relation avec son environnement.

Ce TFE représente pour moi une véritable ouverture d'esprit, qui a profondément enrichi ma vision de l'avenir. Il m'a permis de découvrir de nouvelles approches, techniques et méthodes qui, à mon sens, représentent l'avenir de la construction. Il m'a également amené à réfléchir à ma propre posture d'architecte. Désormais, je suis convaincue de l'importance de pouvoir jouer un rôle actif dans une transition durable et éco-responsable du secteur de la construction. Je souhaite m'engager pleinement dans la conception et la réalisation de projets architecturaux respectueux de l'environnement, et faire de cette démarche une véritable posture professionnelle.

INTRODUCTION

La période de l'après-guerre, en particulier entre 1945 et 1975, a profondément marqué et transformé le secteur de la construction, en raison de la nécessité d'une reconstruction massive et solide pour répondre aux destructions causées par la Seconde Guerre mondiale (Van de Voorde et al., 2015). L'urgence était grande et la main-d'œuvre était insuffisante (Van de Voorde et al., 2015). Ce contexte a engendré l'utilisation de nouvelles techniques constructives comme le préfabriqué lourd en béton et en acier. Ces matériaux ont pris rapidement une place de choix dans la conception architecturale, et leur utilisation bastide à perdurer jusqu'à aujourd'hui (Licordari, 2015).

Toutefois, les conséquences environnementales de ces pratiques sont vite apparues, notamment l'impact significatif sur l'écosystème terrestre. Le secteur de la construction est en effet devenu un contributeur majeur des émissions mondiales de gaz à effet de serre (IPCC, s. d.). Créé en 1988, ce dernier a publié son premier rapport en 1990, mettant en lumière ces enjeux (IPCC, s. d.). Bien que ces matériaux continuent d'être privilégiés, cette persistance s'est souvent faite au détriment de l'intelligence constructive qui caractérisait l'architecture avant-guerre (Van de Voorde et al., 2015).

Aujourd'hui, le secteur de la construction est toujours impactant. Il est responsable de 40% des émissions des gaz à effet de serre et l'impact du béton, de l'acier et du ciment représentent 10% au niveau mondial (Conseil des Architectes d'Europe & Union Internationale des Architectes, 2023). Ce secteur partage donc une part importante de responsabilité dans le réchauffement climatique. L'architecte assume une part de cette responsabilité (Conseil des Architectes d'Europe & Union Internationale des Architectes, 2023 ; *Matériaux de construction : retour aux (bio)resourçes*, 2015), car c'est lui qui sélectionne et recommande les matériaux à utiliser pour matérialiser et construire son projet (Madec, 2021). Ainsi, son rôle actuel revêt une importance capitale pour orienter l'avenir et le secteur vers des matériaux à faible impact environnemental. Il est donc impératif qu'il intègre cette responsabilité dans ses conceptions architecturales, en songeant aux répercussions sur l'environnement. En effet, le conseil des architectes d'Europe (Conseil des Architectes D'Europe, 2024) ce changement à travers divers articles (Conseil des Architectes D'Europe, 2024; Conseil des Architectes d'Europe & Union Internationale des Architectes, 2023). La Commission européenne exprime également des préoccupations quant à l'avenir et à la progression de notre société. À cet effet, l'Europe formule de nombreuses ambitions. Elle cherche notamment à rendre les bâtiments plus sains, plus confortables, plus économes en énergie et plus circulaires dans leur conception (European Union, 2021), tout en favorisant la résilience grâce à l'utilisation de matériaux locaux. En effet, la dernière révision de la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments, adoptée le 24 avril 2024, oblige les États membres à garantir que tous les nouveaux bâtiments soient à émissions nulles. Autrement dit, **ces bâtiments doivent consommer peu d'énergie tout en limitant, voire en éliminant, les émissions de gaz à effet de serre**. La directive stipule également que, d'ici la fin de la décennie (2030), toutes les nouvelles constructions ainsi que les bâtiments nécessitant une rénovation d'ici 2050, devront limiter, voire supprimer complètement leurs émissions (European Union, 2024).

Le choix des matériaux de construction représente donc une préoccupation capitale dans le domaine de l'architecture et de la construction. **Les matériaux biosourcés et géosourcés se présentent comme une alternative écologique et circulaire**, étant donné leur caractère naturel, peu transformé, réemployables, valorisables et issus de la biomasse végétale ou animale. En tant que puits de carbone, ils contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et affichent un bilan carbone nettement plus favorable (Vegetal(E), 2015).

Le secteur de **la construction doit s'ancrer dans une transition environnementale et circulaire** dans laquelle les matériaux bio et géosourcés sont vus comme une alternative à des matériaux conventionnels plus émissifs et vont permettre la création d'une nouvelle architecture (Lenoir & Gauzin-Müller, 2018; Madec, 2021). Ce paradigme est déjà visible dans le travail et les pratiques d'architectes tels que Francis Kéré (Kéré Architecture,

s. d.-b), Martin Rauch (Lehm Ton Erde, s. d.), Simón Vélez, Anna Heringer (Heringer, s. d.), Gilles Perraudin (Atelier Architecture Perraudin, s. d.), le bureau d'architecture Archiplein (Archiplein, s. d.), BC Architectes (BC Architects & Études & Matériaux, s. d.), Karbon (Karbon, s. d.) , et bien d'autres encore. Ils se sont emparés de ces matériaux en s'appuyant sur leurs propriétés pour développer une nouvelle architecture. Leur approche conceptuelle repose à la fois sur les techniques constructives vernaculaires, les savoir-faire locaux, la conception bioclimatique et le développement de techniques innovantes.

Un matériau biosourcé est un matériau issu de la biomasse, c'est-à-dire de matières premières d'origine végétale ou animale. Ces matériaux sont généralement considérés comme naturels lorsqu'ils subissent peu de transformations, conservant ainsi une composition proche de leur matière d'origine. Ils sont souvent biodégradables, compostables et présentent un fort potentiel de renouvelabilité. Ils se distinguent par leur faible impact environnemental et leur capacité à stocker du carbone. Ils s'inscrivent ainsi dans une démarche de construction durable, respectueuse des ressources naturelles (Ecobuild.Brussels, s.d.).

Cependant, malgré l'utilisation croissante de ces matériaux dans les constructions par les architectes, il existe encore **un manque de connaissances et de cadres techniques clairs** pour démontrer pleinement leurs qualités techniques, physiques et environnementales. Cela freine l'adoption généralisée de ces matériaux par les architectes, limitant ainsi le potentiel d'une architecture contemporaine, innovante et à faible impact environnemental.

Face à ce contexte, l'enjeu de ce travail est de comprendre comment, à partir de leurs qualités intrinsèques, les architectes ont volontairement intégré ces matériaux pour créer une nouvelle architecture, davantage intégrée climatiquement, environnementalement et socialement. Parmi le panel de matériaux bio et géosourcés disponibles sur le marché, le bambou, la terre crue et la pierre massive ont été sélectionnés. Ce choix de matériaux a été judicieux. En effet, ils permettent d'obtenir des résultats architecturalement parlant intéressants et peuvent être comparés.

De cette réflexion découle la question de recherche suivante : **Conception ecoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture?** Ce TFE s'attachera plus spécifiquement à trois matériaux biosourcés, avec comme sous-question : **Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive.**

Ce travail a pour objectif d'identifier les propriétés physiques, mécaniques et environnementales de trois matériaux naturels. Il vise à comparer ces matériaux afin d'en dégager les atouts, les limites et les complémentarités. Il s'agit également de comprendre comment ils sont mis en œuvre dans des projets architecturaux contemporains et les traces de l'architecture vernaculaire. Enfin, l'objectif est également d'explorer leurs synergies possibles ainsi que leurs applications potentielles dans nos régions, dans le but de démontrer qu'ils constituent aujourd'hui une alternative crédible et pertinente pour construire une architecture plus durable.

L'état de l'art

L'état de l'art est structuré en deux volets. Le premier met en évidence les propriétés de ces trois matériaux qui ont été étudiées dans la littérature, le bambou, la terre crue, la pierre massive ainsi que les aspects non étudiés. Le deuxième volet met en évidence les architectes précurseurs (Anna Heringer, Francis Kéré, Martin Rauch, Simon Vélez, Gilles Perraudin, le bureau d'architecture Archiplein, ect) qui exploitent ces matériaux pour créer une nouvelle architecture. Malgré une abondance de documentation sur les performances des matériaux, les architectes manquent de ressources pour les intégrer efficacement dans leurs projets.

Les matériaux bio et géosourcés peuvent être utilisés en architecture pour construire de manière plus éco-responsable (Bourbia et al., 2023). Ils offrent des solutions techniques vertueuses. Certaines sont éprouvées depuis des siècles alors que d'autres s'inventent aujourd'hui. Allier terre et fibres végétales valorise la mixité des matériaux (Phung, 2018) et réaffirme l'importance de l'intelligence constructive, qui vise à utiliser la juste quantité du bon matériau au bon endroit (Madec, 2021). De nombreuses études et financements ont été effectués à ce sujet comme par exemple l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) (Vegetal(E), 2015). Ces matériaux sont porteurs de sens pour le développement durable et permettent un meilleur avenir (Vegetal(E), 2015; Simons et al., 2015). Ce sont des matériaux issus de la biomasse végétale, minérale ou animale et exploitables dans presque tous les pays. Ils réduisent considérablement les émissions de gaz à effet de serre. Ils ont un meilleur bilan carbone (Simons et al., 2015). Cette approche est étroitement liée à l'architecture vernaculaire, laquelle se caractérise par une intégration harmonieuse et cohérente avec son environnement (Grodwohl, 2013).

Le bambou est, à la base, une grande graminée qui se développe dans des climats tropicaux et subtropicaux (Gauzin-Müller, 2018). Il en devient un matériau lorsqu'il est exploité pour créer une architecture. Celui-ci est étudié en Europe depuis les années 1900 mais utilisé de manière vernaculaire en Asie et en Amérique du Sud depuis que l'homme construit son habitat. Il porte le surnom "le bois du pauvre" (Nurdiah, 2016). Le bambou est connu pour sa rapidité de pousse ce qui permet une disponibilité constante (Vegetal(E), 2015 ; Shah et al., 2018) et pour son caractère durable (Dixon & Gibson, 2014). En construction, il a été énormément étudié en tant que matériau structurel (Dixon & Gibson, 2014; Shah et al., 2018). Sa fibre est reconnue pour être très résistante (Nurdiah, 2016). Cette utilisation permet la mise en œuvre de divers assemblages intéressants comme la forme de celui-ci est circulaire et creuse (Nurdiah, 2016). Le bambou, avant sa mise en œuvre, subit un traitement afin de le rendre jusqu'à 5 fois plus durable (Gnanaharan, 2002; Nurdiah, 2016) car il est sujet à des attaques de termites et de champignons en raison de sa vulnérabilité à ces organismes nuisibles (Nurdiah, 2016). Le bambou est énormément étudié en traction (Dixon & Gibson, 2014; Nurdiah, 2016) et est souvent comparé au comportement de l'acier mais très peu en compression. Du peu d'informations trouvées, sa résistance en compression dépasse celle du béton (Nurdiah, 2016). Ses propriétés de flexion permettent au matériau de garder une courbure sans céder (Nurdiah, 2016). De nombreux auteurs soulignent la performance et la remarquable capacité structurelle du bambou, mais aucune recherche ne semble mettre en lumière des normes constructives relatives à ses assemblages, ses techniques de mise en œuvre, sa découpe, et autres aspects connexes.

La terre crue est utilisée en construction depuis des milliers d'années (Gomes et al., 2019; Mango-Itulama & Fagel, 2022) et est une ressource abondante qu'on retrouve presque partout (Binici et al., 2007; Mango-Itulama & Fagel, 2022; Ren & Kagi, 1995). La terre crue est un matériau qui a une bonne résistance à la compression (Mango-Itulama & Fagel, 2022; Ren & Kagi, 1995). Plus cette résistance est élevée, plus elle aura une longue durée de vie (Mango-Itulama & Fagel, 2022). Elle est aussi reconnue pour ses propriétés thermiques (Binici et al., 2007). Les constructions utilisant cette ressource doivent prêter attention aux précipitations pluviales car le matériau est poreux (Heathcote, 1995). La terre crue peut être mélangée avec des fibres afin de rendre cette

ressource un matériau biosourcé (Simons et al., 2015). La terre crue est très étudiée quant à ses propriétés, sa résistance à la compression et son comportement mécanique (Mango-Itulamy & Fagel, 2022) mais il existe très peu de documentations quant à sa mise en œuvre dans la construction dans des climats tempérés au sujet des normes et des cadres techniques. En construction, les informations se limitent aux techniques comme le pisé, la bauge et les briques d'adobe (Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024). Ces différentes techniques constructives doivent mobiliser des liants.

La pierre massive est un matériau qui est utilisé en architecture depuis longtemps (Le Dréan & Kuratli, 2022). C'est un matériau disponible autant à la surface que dans la Terre (Perraudin, s. d.). Ce matériau se distingue par sa solidité et sa durabilité (Tehami & Anouche, 2017). Exploité dans des carrières, ce matériau naturel est particulièrement prisé pour sa résistance à la compression (CTMNC & UNTEC, 2015). Il a néanmoins une moins bonne résistance à la flexion (Laurent, 2011). Ses propriétés thermiques ont été étudiées en raison de sa capacité à emmagasiner et à restituer lentement la chaleur, ce qui en fait un choix intéressant pour le confort thermique des bâtiments (Didelon, 2020; Pressacco & Barrault, 2018). La pierre massive est couramment utilisée dans des constructions à haute inertie thermique ou pour des éléments porteurs tels que les murs et les voûtes. Cependant, l'extraction et la transformation de ce matériau nécessitent une attention particulière en raison de leur impact environnemental élevé (Laurent, 2011). Si elle est reconnue pour sa durabilité exceptionnelle, la pierre massive est peu étudiée en ce qui concerne sa mise en œuvre dans des contextes contemporains et l'intégration de normes liées à la construction écologique.

Ces matériaux ont fait l'objet de nombreuses études mais celles-ci se concentrent principalement sur leurs propriétés techniques, mécaniques et physiques. Cependant, il existe un manque notable d'informations traitant de ces matériaux dans le contexte de l'architecture, notamment en ce qui concerne leur mise en œuvre, leurs assemblages et leurs usages. En raison de cette lacune dans la littérature scientifique, l'analyse se concentre sur l'étude de projets architecturaux et des architectes ayant choisi d'utiliser ces matériaux dans leurs réalisations. Bien que des ouvrages existent sur ces architectes et leurs projets, ils n'entrent jamais dans le détail de la construction. Ceux-ci ont acquis au cours de leurs expériences une certaine connaissance mais cette connaissance est encore aujourd'hui peu traduite et mériterait des recherches plus approfondies pour aider le secteur de la construction à s'emparer de ces techniques et de ce type de construction. Il est judicieux de comparer leurs techniques, leurs mises en œuvre en fonction de différents climats afin d'élargir la compréhension. Les matériaux précédemment cités n'ont pas une utilisation abondante et nécessitent donc une valorisation.

En conclusion, la littérature scientifique offre une abondance d'informations sur les propriétés et les qualités du bambou, de la terre crue et de la pierre massive, mais elle est peu informative quant à leur mise en œuvre. Cela reflète un manque notable de normes régissant leur utilisation en architecture, ce qui entrave leur adoption. La suite de cette étude se concentre donc sur les propriétés des matériaux documentées scientifiquement, tandis que la compréhension et l'analyse s'appuient principalement sur la littérature grise. Cela permet de saisir comment certains architectes intègrent ces matériaux dans leurs projets et quelles motivations guident leurs choix.

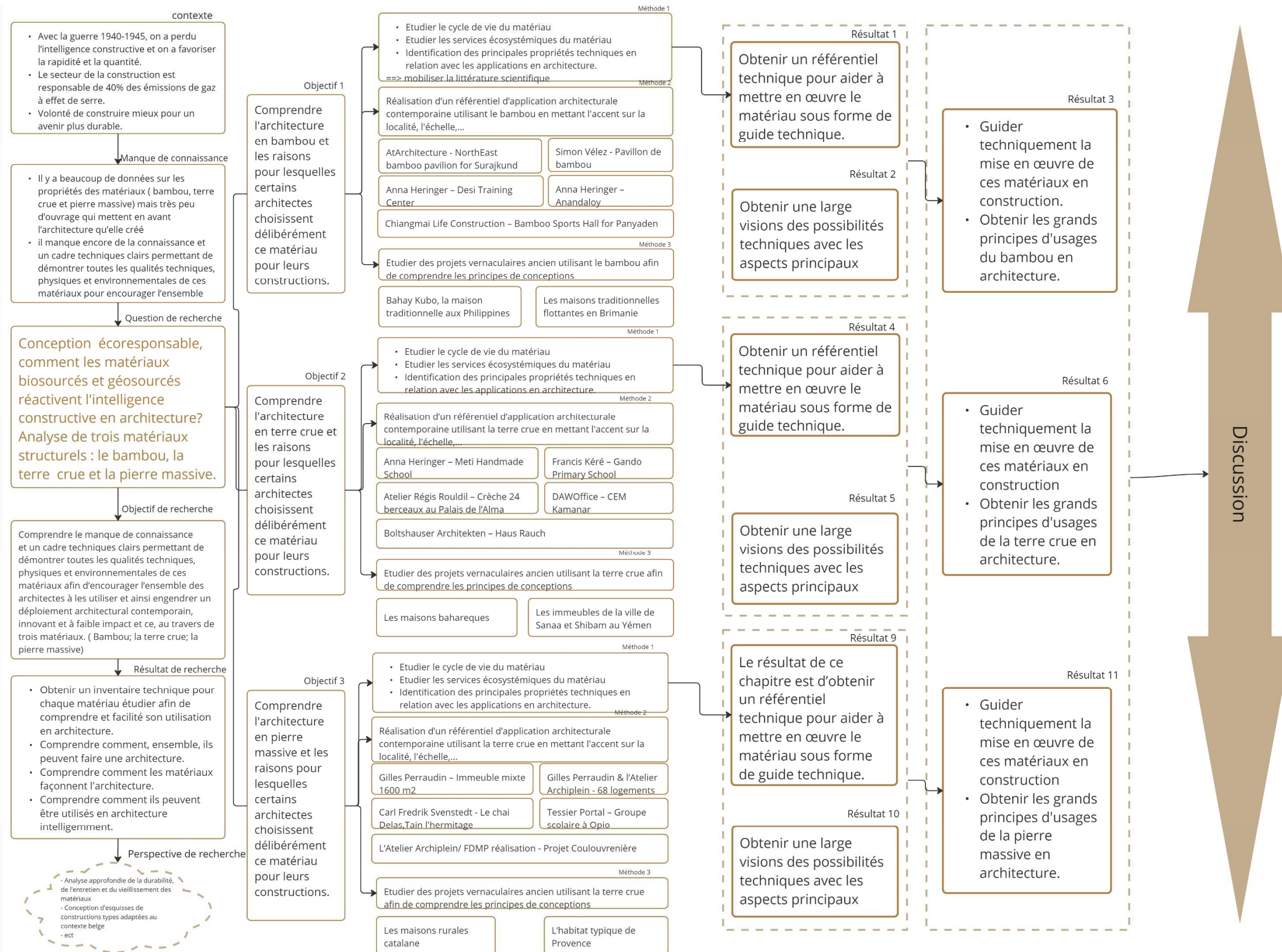


Figure 1 : Méthodologie de recherche.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Méthodologie

La méthodologie de ce travail s'articule en trois parties comme l'illustre le schéma ci-dessus.

La première partie, sur base d'une littérature scientifique et technique, rassemblera les propriétés et caractéristiques des trois matériaux (bambou, terre crue, pierre massive). Elle sera subdivisée en trois chapitres, chacun dédié à l'un de ces matériaux. Chaque chapitre inclura une description du cycle de vie du matériau, de ses services écosystémiques, de ses principales propriétés physiques et mécaniques, ainsi que de son usage en construction. Cette analyse aboutira à l'élaboration de trois tableaux synthétiques récapitulatifs qui serviront d'assise pour l'étape suivante. Cela va permettre de mieux comprendre comment les architectes utilisent ces matériaux en construction.

La deuxième partie portera sur l'analyse de cinq projets architecturaux pour chaque matériau, en suivant une grille d'évaluation intégrant plusieurs critères : l'échelle du projet, la localisation, l'usage, les techniques de mise en œuvre, le type de matériau (essence, mélange, provenance, section, usage, etc.), ainsi que les assemblages et connecteurs utilisés.

Les projets suivants seront analysés pour le bambou :

- AtArchitecture - NorthEast bamboo pavilion for Surajkund Craft Fair
- Anna Heringer – Anandaloy
- Anna Heringer – Desi Training Center
- Simon Velez – Pavillon de bambou
- Chiangmai Life Construction – Bamboo Sports Hall for Panyaden

Les projets suivants seront analysés pour la terre crue :

- Anna Heringer – Meti Handmade School
- Francis Kéré – Gando Primary School
- Boltshauser Architekten – Haus Rauch
- Atelier Régis Rouldil – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma
- DAWOffice – CEM Kamanar

Les projets suivants seront analysés pour la pierre massive :

- Gilles Perraudin – Immeuble mixte 1600 m²
- Gilles Perraudin & l'Atelier Archiplein - 68 logements collectifs en pierre massive 15 500m²
- L'Atelier Archiplein/ FDMP réalisation - Projet Coulouvrenière (10 logements sociaux au bord du Rhône)
- Tessier Portal – Groupe scolaire à Opio
- Carl Fredrik Svenstedt - Le chai Delas,Tain l'hermitage

En complément de cette analyse des architectures contemporaines, une étude des constructions vernaculaires anciennes utilisant le bambou (Bahay Kubo ; Maisons traditionnelles flottantes en Birmanie), la terre crue (Les immeubles des villes de Sanaa au Yémen ; La ville de Ghadamès en Libye) et la pierre massive (Les maisons rurales catalane et l'habitat typique de Provence) sera menée.

Ces deux analyses s'appuieront principalement sur des ouvrages spécialisés lorsque les projets sont bien documentés. Lorsque cela est possible, un contact direct avec les architectes sera privilégié. Enfin, en l'absence d'autres sources scientifiques, l'étude se fondera sur la littérature grise.

L'ensemble des analyses sera intégré dans un tableau récapitulatif présentant les aspects principaux, et sera discuté en fin de chapitre.

La troisième partie sera consacrée à une discussion sur les données collectées dans les deux parties précédentes. Elle aura pour objectif d'analyser ces matériaux, de comprendre comment les utiliser de manière intelligente, d'examiner leur impact sur l'architecture et d'explorer les possibilités qu'offre leur combinaison pour donner naissance à de nouvelles approches architecturales. Cette réflexion inclura également une étude de leur potentiel d'usage dans nos régions, en identifiant les obstacles à surmonter et les leviers à activer pour favoriser leur intégration. Une comparaison avec d'autres matériaux sera abordée, en s'appuyant notamment sur des analyses environnementales, en particulier pour la pierre et la terre crue. Enfin, cette dernière partie mettra en évidence comment ces matériaux biosourcés et géosourcés participent à une réactivation de l'intelligence constructive, à travers l'engagement volontaire des architectes. Elle démontrera ainsi qu'ils constituent aujourd'hui une alternative crédible et pertinente en architecture.

PARTIE I

De l'extraction aux propriétés

Cette première partie est subdivisée en trois chapitres, chacun correspondant à un matériau (bambou ; terre crue ; pierre massive).

Dans un premier temps, cette partie s'attarde sur le cycle de vie de chacun des matériaux étudiés. Celle-ci inclut toutes les étapes, depuis l'extraction ou la récolte de la matière première, en passant par sa transformation, jusqu'à son recyclage ou sa revalorisation en fin de vie.

Dans un deuxième temps, une analyse des services écosystémiques fournis par chacun de ces matériaux. Cette approche est ainsi simplifiée sous l'appellation « services rendus par les matériaux ». Dans le cas du bambou, étant une plante vivante, l'étude inclut les services rendus par la plante au cours de sa croissance. En revanche, cette analyse n'est pas applicable à la terre crue ni à la pierre massive, ces matériaux n'ayant pas de dimension biologique active. Dans cette partie d'étude, très peu de sources nous indique clairement les services écosystémiques qu'apporte un matériau. C'est pourquoi, je me base sur les sources scientifiques telles que le livre de Ph. Méral et de D. Pesche (2016) afin de déduire les services écosystémiques de chaque matériaux en fonction de la définition donnée.

Dans un troisième temps, l'analyse se concentre sur les propriétés techniques du matériau, notamment leurs performances structurelles. Ces propriétés sont étudiées en lien direct avec les enjeux pratiques liés à leur usage dans des projets contemporains ou traditionnels.

Dans un quatrième temps , l'analyse examine ensuite les méthodes de mise en œuvre des matériaux, en se penchant sur les techniques d'assemblage et les outils. Cette étape permet de mieux comprendre comment ces matériaux peuvent être intégrés dans des projets.

Dans un cinquième temps, elle explore les propriétés physiques, telles que l'isolation thermique et acoustique, l'inertie thermique, ou encore la réaction aux sollicitations environnementales (humidité, variations de température, etc.). Ces caractéristiques influencent directement le confort des occupants.

Enfin, l'étude s'intéresse aux normes et réglementations encadrant ces trois matériaux.

Les trois chapitres sont suivis d'une conclusion qui synthétise les données recueillies et établit les bases des discussions à venir sur leur mise en œuvre et leur rôle en architecture.



Chapitre 1 :

Le bambou : un matériau
durable aux multiples
atouts

Introduction

Le bambou est une plante appartenant à la famille des graminées, caractérisée par une croissance rapide et une grande adaptabilité aux environnements tropicaux et subtropicaux (Lenoir & Gauzin-Müller, 2018). Bien qu'il soit utilisé de manière vernaculaire depuis des millénaires en Asie et en Amérique du Sud pour la construction d'habitations (Nurdiah, 2016), ce n'est qu'au début du XXe siècle qu'il a commencé à faire l'objet d'études approfondies en Europe.

Le bambou présente des caractéristiques uniques qui en font une ressource particulièrement intéressante pour la construction durable. Sa croissance exceptionnelle, pouvant atteindre jusqu'à un mètre par jour, permet de le considérer comme une ressource abondante, rapidement renouvelable, et respectueuse de l'environnement (Dixon & Gibson, 2014; Shah et al., 2018).

Il existe plusieurs espèces de bambou mais en construction, le bambou de *Guarda angustifolia* et les bambous *phyllostachys endulis* sont les plus utilisés. Le bambou est constitué de plusieurs parties distinctes (cf. figure 1), mais en construction, c'est le chaume qui est le plus couramment utilisé. Avant de procéder à sa coupe, il est nécessaire d'attendre au moins trois ans, afin de permettre au bambou d'atteindre sa pleine maturité (Bielema, 2018). Une fois mûr, il est récolté à l'aide d'une machette ou d'une scie, puis soumis à un processus de séchage. Ce séchage est essentiel pour améliorer la durabilité du matériau et renforcer sa résistance face aux divers agents nuisibles, tels que les insectes et les champignons. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées : le séchage à l'air libre, après immersion dans l'eau, par exposition à la chaleur ou encore par fumigation (Hidalgo, 2018).

Les propriétés physiques et mécaniques du bambou sont influencées par divers facteurs, notamment l'espèce, l'âge, la section de la tige, ainsi que les conditions environnementales telles que le climat (Minke, 2023). En conséquence, il est difficile de trouver des données précises, d'autant plus que le bambou n'est pas aussi bien documenté que des matériaux traditionnels. De plus, la littérature scientifique sur le bambou manque souvent de spécificité.

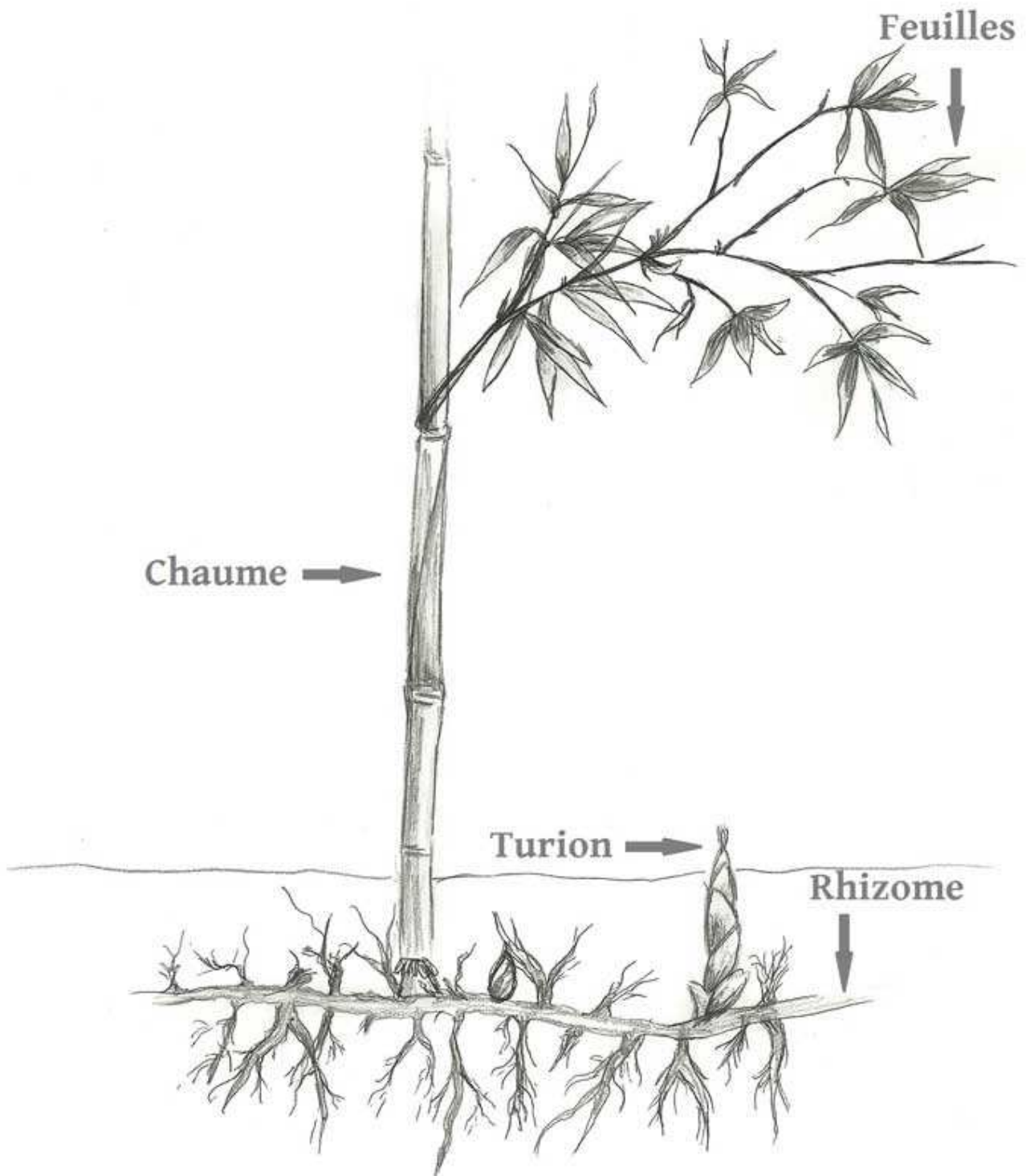


Figure 2 : Description des différentes parties du bambou.
Source : <https://www.desjardins-inspirations.fr/les-bambous-dexterieur/>

Cycle de vie

Phase de production et de cultivation :

Le bambou, avec sa croissance rapide, atteint sa maturité en 3 à 5 ans, ce qui en fait une ressource rapidement renouvelable (Vegetal(E), 2015; Shah et al., 2018). Il est principalement cultivé en Asie, en Amérique latine et en Afrique (Nurdiah, 2016). Lorsqu'il est prêt à être récolté, le bambou est coupé avec précaution pour préserver la base des racines, ce qui permet aux pousses de se régénérer naturellement sans nécessiter de replantation (Hidalgo, 2018). Cette méthode réduit l'impact écologique et soutient un cycle de production durable. Une fois récolté, le bambou est séché et parfois traité pour se prémunir contre les parasites et améliorer sa durabilité en vue des étapes suivantes de transformation et d'utilisation (Hidalgo, 2018).

Phase de Fabrication et de Préparation

Une fois coupé, le bambou subit un traitement avec des produits chimiques comme l'acide borique ou en anglais Borax boric acid (Nurdiah, 2016) qui le rend jusqu'à cinq fois plus durable, le protégeant ainsi des insectes et des attaques de termites (Gnanaharan, 2002; Hidalgo, 2018; Nurdiah, 2016). Le bambou peut être transformé ou utilisé brut pour répondre aux besoins de la construction. Cette phase de fabrication peut impliquer plusieurs étapes : coupe ou sciage (avec une machette ou une scie), collage, pressage ou laminage (Gnanaharan, 2002; Hidalgo, 2018).

Phase de mise en œuvre ou de construction

Le bambou est un matériau polyvalent mais il est très souvent utilisé en tant que matériau de structure au vu de ses propriétés mécaniques. Sa mise en œuvre se réalise à l'aide d'assemblages traditionnels, comme les ligatures, ou de méthodes modernes, comme les connecteurs métalliques, qui garantissent davantage de solidité et de durabilité dans le temps (Hidalgo, 2018).

Phase de fin de vie

Le bambou présente l'avantage d'être souvent assemblé de manière réversible, ce qui rend son démontage et son réemploi particulièrement faciles (Jolliet et al., 2010). En effet, les assemblages restent simples et n'affectent que les extrémités de la tige de bambou. Dans le cas d'assemblages mécaniques, comme des fixations par boulons ou des attaches métalliques, le démontage est tout aussi simple, permettant de séparer les pièces afin de les réutiliser ou de les recycler. En revanche, si du béton a été coulé dans le bambou, sa réversibilité, son potentiel de réemploi et son recyclage sont nuls.

Le recyclage du bambou offre par ailleurs de nombreuses possibilités. Il peut être transformé en lamelles pour d'autres usages en construction et/ou pour façonner un tissage ou encore réduit en copeaux pour différents produits dérivés par exemple.

Services écosystémiques

Un service écosystémique désigne un bénéfice que les écosystèmes naturels offrent aux êtres humains, tel que la régulation climatique, la rétention d'eau, ou encore la séquestration du carbone (Méral & Pesche, 2016).

Services environnementaux (sol, eau, air)

- Amélioration et restauration de la qualité des sols :

Cette plante pérenne, qui vit plusieurs années sans devoir être replantée, contribue à enrichir le sol grâce à la matière organique qu'elle produit en abondance, notamment à travers ses racines qui se renouvellent naturellement et la chute ses feuilles. Ces résidus organiques apportent du carbone au sol, améliorant sa fertilité et favorisant le stockage du carbone, un atout pour l'environnement (Y. Xu et al., 2022). Cela favorise la régénération des sols et agit donc positivement sur la fertilité (Ben-zhi et al., 2005; Mailly et al., 1997).

- Dépollution des sols :

Le bambou possède une capacité à restaurer les sols dégradés. Il élimine certaines toxines présentes dans le sol ainsi qu'il absorbe certain polluant organique (Piouceau et al., 2020).

- Lutte contre l'érosion :

Le bambou est doté d'un système racinaire dense qui s'étendant horizontalement et contribue également à la stabilisation ce qui aide à limiter l'érosion des sols (Nurdiah, 2016) et que par cet effet, retient les sols (Lumb, 1997).

- Gestion des eaux pluviales :

Le système racinaire du bambou crée des cavités dans le sol en se décomposant, facilitant l'infiltration des eaux de pluie (Lu et al., 2007). Cette structure améliore la recharge des nappes phréatiques (Ben-zhi et al., 2005).

- Amélioration de la qualité de l'eau :

Le réseau racinaire se développant rapidement et ensuite en se décomposant laisse des cavités, ce qui augmente les cheminements pour que l'eau puisse s'infiltrer dans le sol (Lu et al., 2007). Les feuilles qui s'accumulent au pied du bambou forment un tapis naturel qui limite l'évaporation de l'eau et aide à conserver l'humidité du sol. Ce mécanisme contribue à la recharge des nappes phréatiques, apportant ainsi une valeur écologique supplémentaire (Ben-zhi et al., 2005).

- Captation du carbone :

Le bambou, bien qu'il puisse atteindre de grandes tailles et peut être aussi robuste que certains arbres, appartient à la famille des Poacées c'est une herbacée (Diep et al.,2021 Collin et al.,2020). Le bambou permet de contribuer à la capture du carbone (Diep et al.,2021), aidant ainsi à limiter progressivement la concentration de substances chimiques nocives dans l'atmosphère et à protéger la couche d'ozone (Disén & Clouston, 2013; X. Xu et al., 2022).

- Conservation des ressources

Grâce à sa croissance rapide, sa durabilité et ses multiples usages, le bambou représente une ressource renouvelable de premier plan, limitant la pression sur les forêts et les écosystèmes naturels (Dixon & Gibson, 2014; Shah et al., 2018).

Services sociaux (alimentation, bien être, santé) :

- Bienfaits en milieu urbain

Le bambou offre divers services sociaux liés à l'alimentation, au bien-être et à la santé. Grâce à sa croissance rapide et à son faible besoin en espace, il favorise le retour de la végétation en milieu urbain (Malagnoux, 1990), participant ainsi à l'amélioration du microclimat. Il contribue également à la réduction des îlots de chaleur en apportant de l'ombrage et en régulant l'humidité ambiante. Par ailleurs, certaines espèces de bambou produisent des pousses comestibles, offrant une source d'alimentation locale en ville. Son intégration dans l'urbanisme et l'économie est ainsi renforcée par ses multiples bénéfices écologiques et alimentaires (Horvath, 2012).

Services économiques

- Cycle de croissance

Le bambou a une grande capacité de croissance qui peut atteindre jusqu'à un mètre par jour. Après avoir été coupé, il repousse naturellement à partir de ses racines sans qu'il soit nécessaire de replanter. Cette régénération rapide en fait une plante idéale pour un usage durable, car elle limite l'impact environnemental lié à l'extraction des ressources (Dixon & Gibson, 2014; Shaha et al., 2018).

Services culturels

- Valorisation de techniques ancestrales

Le bambou est un matériau utilisé depuis des millénaires par l'humanité, et son usage connaît aujourd'hui un regain d'intérêt dans de nombreux domaines. Historiquement, il a servi à la fabrication d'objets du quotidien, d'outils et de mobilier, témoignant de la polyvalence de ce végétal. Il est devenu un matériau de construction à part entière, utilisé pour ériger des maisons, des ponts et des échafaudages. Aujourd'hui, son usage est réactivé dans le cadre d'une architecture durable et innovante, où il est revalorisé comme une ressource renouvelable et écologique.

Propriétés structurales en tant que matériau de construction

Résistance mécanique

Le bambou présente des propriétés mécaniques remarquables, qui en font un matériau de construction très intéressant (Dixon & Gibson, 2014; Shah et al., 2018). Etant très souvent utilisé en structure, il est connu pour avoir une bonne résistance à la traction (Lou et al., 2023). Cela est dû aux fibres contenues dans le bambou (Nurdiah, 2016).

Comparé à des matériaux plus familiers, sa résistance à la traction est équivalente à celle de l'acier et surpassée par celle du bois (Nurdiah, 2016). Sa résistance à la compression, bien que moins étudiée, est également remarquable et dépasse les performances du béton (Nurdiah, 2016).

La résistance du bambou varie en fonction de l'espèce et de son âge. Un bambou jeune, par exemple, ne dispose pas des mêmes capacités structurelles qu'un bambou mature (Hidalgo, 2018).

La densité du bambou se situe généralement entre 500 et 600 kg/m³, bien qu'elle puisse fluctuer selon l'espèce et les méthodes de traitement (Bamboo Concept, s.d.).

Flexibilité et élasticité

Le bambou présente une grande flexibilité naturelle. En effet, sa structure fibreuse lui permet de se plier sans se rompre sous des charges importantes et de pouvoir retrouver sa forme initiale après avoir subi des contraintes (Nurdiah, 2016).

Mise en œuvre et assemblages

Une fois séché et correctement traité contre les insectes et l'humidité, le bambou devient un matériau idéal pour la construction. Sa forme cylindrique et creuse, combinée à sa flexibilité naturelle, permet de créer une grande variété d'assemblages ingénieux et adaptés à diverses applications (Nurdiah, 2016). Utilisé aussi bien pour les structures porteuses que pour les revêtements, le bambou se distingue par sa polyvalence et ses propriétés mécaniques.

Cette partie, qui présente et explique les principaux types d'assemblages de bambous, repose principalement sur une approche d'interprétation et de compréhension d'illustrations, telles que des photos et des croquis d'assemblages.

Assemblages traditionnels :

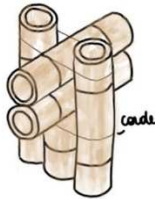


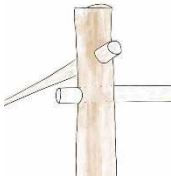
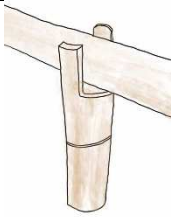
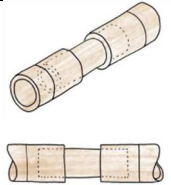
	Mise en œuvre	Schéma	Connecteur	Usage
Techniques de nœuds et de ligatures	Cet assemblage consiste à enrouler et nouer une corde autour des pièces de bambou pour les maintenir fermement en place. Cette technique est réalisée à la main et s'adapte aux différentes configurations des pièces (parallèles, croisées, en "T").	 <p>Figure 3 : Techniques d'assemblages de bambou avec des nœuds et ligatures. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	<p>Pour solidifier et assembler les bambous entre eux, cet assemblage nécessite des éléments de connexion naturels tels que la corde, le rotin ou encore des fibres naturelles.</p>  <p>Figure 4 : Corde Végétale pour Assembler le Bambou. © pandambambou.com pandambambou.com Source : https://pandam.fr/products/corde-assemblage-bambou</p>	Cet assemblage est utilisé pour la construction de structures, notamment pour la réalisation de planchers. Il sert également à la fabrication d'échafaudages qui permettent de faciliter la construction du bâtiment.
Assemblage en entaille croisée	L'assemblage en entaille croisée consiste à découper les bambous pour qu'ils s'emboîtent, avec des bords nets obtenus à la scie. Ils sont ensuite assemblés et solidifiés par des nœuds, ligatures ou boulons .	 <p>Figure 5 : Techniques d'assemblages de bambou à entaille croisée. (Adaptée par Maton.I). Source : Hidalgo, O. L. (2018)..</p>	Pour assurer la solidité de l'assemblage, des éléments de connexion naturels comme la corde, le rotin ou les fibres végétales sont utilisés (cf. figure 4).	L'assemblage en entaille croisée est couramment utilisé dans les structures en bambou nécessitant une jonction angulaire, comme pour une toiture.
Assemblages crantés et percés	Dans un assemblage cranté, des encoches sont taillées dans le bambou pour assurer un emboîtement précis, stabilisant la structure sans connecteurs. L'assemblage percé repose sur le perçage de trous pour insérer une pièce traversante ou une cheville en bois, garantissant un alignement stable.	 <p>Figure 6 : : Exemple d'assemblage de bambou cranté et percé. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	Cet assemblage nécessite aucun connecteur. Le système d'emboîtement suffit pour assurer une stabilité correcte.	Cet assemblage est utilisé pour la construction de structures légères. Il sert également à la fabrication d'échafaudages qui permettent de faciliter la construction du bâtiment. Il peut également former une échelle.
Assemblage par enfourchement	La mise en œuvre de la technique d'assemblage par enfourchement consiste à insérer une tige de bambou dans l'extrémité d'une autre, après avoir taillé les pièces pour un ajustement précis. Il peut être renforcé par des ligatures, du rotin ou des cordes pour garantir une fixation solide.	 <p>Figure 7 : Exemple d'assemblage de bambou par enfourchement. (Adaptée par Maton.I). Source : https://bambouenfrance.fr/assemblage-bambous/</p>	Cet assemblage peut être renforcé à l'aide d'éléments de connexion naturels tels que la corde, le rotin ou les fibres végétales (cf. figure 4).	Cet assemblage est utilisé pour la réalisation de structures légères et pour la fabrication d'échafaudages, facilitant ainsi la construction du bâtiment.
Assemblage par emboîtement ou insertion	L'assemblage par emboîtement consiste à insérer un bambou de plus petit diamètre dans un bambou de plus grand diamètre. Pour solidifier l'assemblage, on insère un goujon.	 <p>Figure 8 : Assemblage de bambou par emboîtement ou insertion. (Adaptée par Maton.I). Source : https://bambouenfrance.fr/assemblage-bambous/</p>	La connexion s'effectue à l'aide d'un goujon en bambou ou en bois, inséré dans des trous préalablement percés pour fixer les deux pièces.	Cet assemblage permet de prolonger la longueur des bambous.

Figure 10 : Tableau récapitulatif des assemblages traditionnels en bambou

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Assemblages modernes :

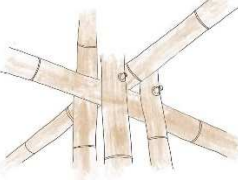
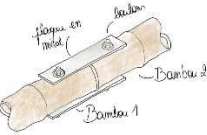
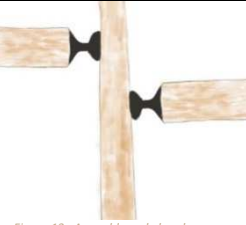

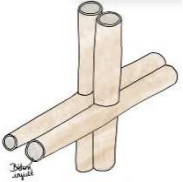
	Schéma	Mise en œuvre	Connecteur	Usage
Boulons et vis	 <p>Figure 11 : Assemblage de bambous par boulons et vis. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	Cet assemblage moderne utilise des boulons ou encore des vis qui sont enfoncés dans plusieurs bambous afin de garantir la solidité de l'assemblage. Cette mise en œuvre remplace la corde utilisée traditionnellement.	Les connecteurs de l'assemblage sont des vis ou des boulons.	Cet assemblage est employé dans des projets contemporains de plus grande envergure, principalement pour la réalisation de planchers, de toitures plates ou encore d'échafaudages.
Plaques de jonction en acier inoxydable	 <p>Figure 12 : Assemblage de bambous par plaques de jonction en acier inoxydable. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	La mise en œuvre de cet assemblage commence par le positionnement de plaques en acier inoxydable aux jonctions des bambous. Des trous sont percés pour insérer des boulons ou des vis, qui sont ensuite serrés avec des écrous pour assurer une fixation stable.	Les connecteurs de l'assemblage sont des vis ou des boulons avec un ensemble de plaque en acier.	Cet assemblage permet d'assembler deux éléments de bambous afin d'obtenir une plus longue portée. Cet assemblage peut être utilisé en tant que structure verticale et horizontale.
Connecteurs métalliques	 <p>Figure 13 : Assemblage de bambous par connecteurs métalliques. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	Le bambou est inséré dans une pièce métallique afin de créer une liaison entre plusieurs bambous.	Les connecteurs sont une pièce métallique ajusté à la bonne épaisseur du bambou. 	Cet assemblage peut être utilisé comme structure horizontale, permettant de créer des éléments structurels tels qu'un toit ou un plancher.
Assemblage avec béton ou mortier injecté	 <p>Figure 15 : Assemblage de bambous par matière injectée. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	La structure repose sur le même principe que celles vues précédemment. En effet, elle est assemblée avec différents types d'assemblages, puis terminée par un coulage de béton ou de mortier.	Le connecteur est un élément liquide (béton ou ciment) qui avec le temps, durci pour solidifier l'assemblage.	Cet assemblage est utilisé pour créer des structures horizontales, telles qu'un élément de plancher. Il permet également d'assembler des jonctions verticales et horizontales.

Figure 16 : Tableau récapitulatif des assemblages modernes en bambou.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Assemblages au sol :


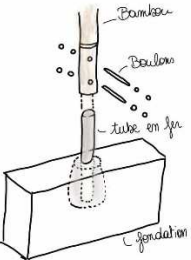
	Schéma	Mise en œuvre	Connecteur	Usage
Connecteurs métalliques	 <p>Figure 17 : Assemblage de bambou au sol par connecteurs métalliques. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	Le connecteur métallique est posé sur le sol. Ensuite, le bambou est inséré dans les endroits prévu et solidifier avec des boulons.	Les connecteurs sont une pièce métallique ajusté à la bonne épaisseur d'un ou plusieurs bambous.	Cet assemblage permet de stabiliser la structure de bambou au sol tout en offrant une connexion entre plusieurs éléments de bambou. Il permet d'assurer une structure verticale.
Ancrages au sol	 <p>Figure 18 : Assemblage de bambou en ancrage au sol. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</p>	Dans cet assemblage, un tube métallique dépasse de la semelle de fondation, qui peut être en béton ou en terre crue consolidée avec des pierres. Ce tube sert de support pour le bambou, qui est inséré autour du tube. Le bambou est ensuite fixé au tube avec des boulons, permettant un assemblage stable entre le bambou et la fondation.	Le connecteur est un élément en fer où le bambou est inséré puis solidifié avec des boulons.	L'encrage au sol avec des fixations modernes permet de stabiliser les structures au sol en utilisant des pieux métalliques ou des semelles en béton.

Figure 19 : Tableau récapitulatif des assemblages au sol en bambou.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

L'objectif ici n'est pas de constituer un référentiel exhaustif de tous les types d'assemblages en bambou, mais de proposer un aperçu des plus courants. En effet, de nombreux systèmes d'assemblages ont déjà été documentés, et *Le manuel de construction en bambou* de Hidalgo (2018) constitue une ressource précieuse dans ce domaine. Ce manuel offre une présentation détaillée et approfondie de plusieurs techniques d'assemblages, fournissant ainsi une base solide de connaissances sur les méthodes pour lier les éléments en bambou.

Tableau de réversibilité des assemblages :

Ce tableau a été élaboré à partir du cours de *Sciences et techniques 2* enseigné par Sophie Trachte. Issu de mon analyse, il vise à évaluer la réversibilité du montage et du démontage des assemblages en bambou, à l'aide de différents indicateurs définis comme suit :

- Géométrie :
 - o Géométrie ouverte (géométrie linéaire, recouvrement symétrique)
 - o Géométrie fermée (recouvrement asymétrique, intégrée d'un côté, intégrée des deux côtés)

Ouvverte	Fermée
----------	--------

- Type d'assemblage :
 - o Assemblage à sec sans élément intermédiaire (emboitement, pose flottante,...)
 - o Assemblage à sec avec élément intermédiaire (corde, boulons, vis,...)
 - o Assemblage humide (colle, mortier, ciment, béton,...)

Assemblage à sec sans élément intermédiaire	Assemblage à sec avec élément intermédiaire	Assemblage humide
---	---	-------------------

- Réversibilité de la connexion :
 - o Connexion réversible (cordage, fibre naturelle, câble métallique)
 - o Connexion réversible avec de légers dommages réparables (ponçage, comblement de trous, remplacement partiel)
 - o Connexion réversible mais entraîne des dommages irréparables (le démontage est possible mais endommage le bambou, le rendant inutilisable)
 - o Connexion non réversible (mortier de chaux ou ciment, béton)

Connexion réversible	Connexion réversible avec de légers dommages réparables	Connexion réversible mais entraîne des dommages irréparables	Connexion non réversible
----------------------	---	--	--------------------------

- Accessibilité au connecteur :
 - o Accessible direct (en direct)
 - o Accessible indirect
 - o Inaccessible

Accessible direct	Accessible indirect	Inaccessible
-------------------	---------------------	--------------

- Simplicité de démontage :
 - o Démontage simple sans outil
 - o Démontage simple avec outils classiques
 - o Démontage complexe avec outils spécifiques et/ou plusieurs hommes
 - o Démontage complexe avec connaissances et outils spécifiques et ou plusieurs hommes

Démontage simple sans outil	Démontage simple avec outils classiques	Démontage complexe avec outils spécifiques et/ou plusieurs hommes	Démontage complexe avec connaissances et outils spécifiques et ou plusieurs hommes
-----------------------------	---	---	--

- Vitesse de démontage :
 - o Démontage rapide
 - o Démontage peu rapide
 - o Démontage lent

Démontage très rapide	Démontage rapide	Démontage lent
-----------------------	------------------	----------------



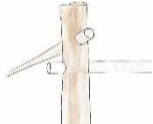



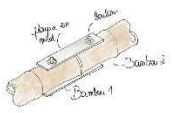
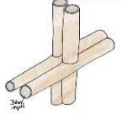

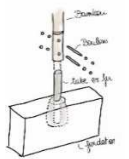
	Géométrie	Type d'assemblage	Réversibilité de la connexions	Accessibilité au connecteur	Simplicité de démontage	Vitesse de démontage
Nœuds et ligatures 						
Entaille croisée 						
Crantés et percés 						
Enfourchement 						
Emboîtement ou insertion 						
Boulons et vis 						
Plaques de jonction en acier 						
béton ou mortier injecté 						
Connecteurs métalliques 						
Ancrages au sol 						

Figure 20 : Tableau de réversibilité des assemblages en bambou.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Propriétés physiques du bâtiment

Le bambou a principalement été étudié pour ses propriétés structurelles (Nurdiah, 2016), tandis que ses caractéristiques liées au comportement thermique ou hygrothermique restent peu explorées. Il est important d'expliquer pourquoi, aujourd'hui, le bambou est essentiellement utilisé comme matériau de structure dans la construction (Nurdiah, 2016).

Dans la littérature scientifique, les recherches concernant l'utilisation du bambou pour l'isolation ou d'autres applications thermiques sont quasiment inexistantes (Liese et al., 2015).

Le bambou présente une conductivité thermique similaire à celle du bois (Takagi et al., 2007 ; Wang et al., 2018). De plus, il est raisonnable de penser qu'il possède de bonnes propriétés de régulation hygrométrique.

Le bambou peut être employé sous forme de tissage, ce qui en fait un matériau de parement, bien qu'aucune étude n'ait démontré les propriétés physiques associées à cette utilisation (cf. figure 21).



Figure 21 : Projet Housing NOW de l'architecte Blue Temple.
Source : <https://www.blue-temple.com/project/housing-now>

Normes et réglementations

En Belgique, le bambou ne bénéficie d'aucune reconnaissance officielle dans les normes et réglementations du secteur de la construction. Cette absence de cadre légal complique son intégration dans les pratiques courantes. De plus, le manque de formation et de maîtrise des techniques associées limite son essor et son utilisation à grande échelle (Hamot, 2017).

Conclusion

En conclusion, le bambou se présente comme une ressource renouvelable, éco-responsable et polyvalente pour la construction durable, notamment grâce sa rapidité de pousse, ses services écosystémiques et ses qualités structurales (Nurdiah, 2016; Shah et al., 2018). Les diverses phases de son cycle de vie (de sa croissance à son recyclage) montrent son faible impact environnemental, renforçant ainsi sa pertinence dans le contexte actuel de développement durable. Son adaptabilité en fait un choix intéressant pour des structures légères ou des constructions temporaires, tout en valorisant une approche de l'architecture qui respecte de l'environnement.

TABLEAU DE SYNTHÈSE - BAMBOU	
SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES	<p>Amélioration et restauration de la qualité des sols : enrichissement en matière organique, amélioration de la fertilité</p> <p>Dépollution des sols : absorption de polluants et toxines</p> <p>Lutte contre l'érosion : stabilisation des sols grâce au système racinaire dense</p> <p>Gestion des eaux pluviales : amélioration de l'infiltration</p> <p>Amélioration de la qualité de l'eau : infiltration améliorée et conservation de l'humidité</p> <p>Captation du carbone : stockage du CO₂, régulation climatique</p> <p>Conservation des ressources : une ressource grandement renouvelable</p> <p>Bienfaits en milieu urbain : amélioration du microclimat, réduction des îlots de chaleur et création d'espaces verts</p> <p>Cycle de croissance : croissance rapide</p> <p>Valorisation de techniques ancestrales : matériau utilisé depuis des millénaires</p>
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	<p>Résistance mécanique : bonne traction et compression (comparable à l'acier et au béton)</p> <p>Flexibilité et élasticité</p> <p>Matériau léger et modulable</p>
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	<p>Faible conductivité thermique</p> <p>Régulation hygrométrique</p>

Figure 22 : Tableau de synthèse sur les propriétés du bambou.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.



Chapitre 2 :

La terre crue : une
disponibilité mondiale

Introduction

La terre crue, matériau de construction utilisé depuis des millénaires (Doat et al., 1979; Houben et al., 2006), retrouve aujourd'hui un intérêt croissant par certains architectes en quête d'une architecture durable et écologique (Binici et al., 2007; Gomes et al., 2019; Mango-Itulamya & Fagel, 2022; Ren & Kagi, 1995).

La terre est un mélange de petits granulats et d'argile. Selon sa qualité, elle peut être tamisée. Pour certaines applications, comme la construction de murs porteurs ou de sols soumis à des contraintes plus importantes, il est possible d'ajouter des stabilisants. Parmi les solutions les plus courantes, on retrouve l'ajout de chaux ou de ciment (Doat et al., 1979). L'ajout de ciment reste cependant modéré, généralement entre 5 et 8 %, afin de conserver les propriétés écologiques et régulatrices de la terre crue tout en les protégeant de l'érosion (Doat et al., 1979).

Cette ressource naturelle est particulièrement prisée pour ses propriétés thermiques et son faible impact environnemental. Sa capacité à réguler l'humidité, à stocker la chaleur et à s'adapter aux techniques locales en fait un matériau idéal pour répondre aux enjeux contemporains d'une architecture respectueuse de l'environnement (Binici et al., 2007; Minke, 2009).

LA TERRE CONTIENT



des cailloux
20cm à 2cm



des graviers
2cm à 2mm



des sables
2mm à 60µm



des argiles
< 2µm



des silts
60µm à 2µm

Figure 23 : Illustration des composants de la terre (Sémon, s.d.).
Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).

Cycle de vie

Phase d'extraction :

La terre crue, utilisée depuis des millénaires, est une ressource abondante, locale et naturelle (Binici et al., 2007; Gomes et al., 2019; Mango-Itulamy & Fagel, 2022; Ren & Kagi, 1995). Elle est extraite directement du sol et généralement proche du site de construction (Doat et al., 1979). L'extraction est réalisée à faible profondeur pour préserver la biodiversité du sol (Fig.5). Ce processus utilise peu d'énergie, comparé aux matériaux de construction industriels, et contribue à un cycle de production écologique et durable.



Figure 24 : Extraction de la terre pour le projet DESI d'Anna Heringer au Bangladesh
Source : <https://divisare.com/projects/127081-anna-heringer-b-k-s-inan-desi>

Phase de Fabrication et de Préparation :

Selon le type de technique constructive souhaité (pisé, torchis, brique de terre crue), des étapes supplémentaires peuvent être nécessaires, comme le moulage, le tamisage, le compactage, l'ajout d'adjuvants naturels (paille, sable, fibres végétales,...) ou le séchage. Ces processus de préparation consomment peu d'énergie et ne nécessitent pas de cuisson, à l'inverse des briques en terre cuite, réduisant ainsi considérablement l'empreinte carbone (Minke, 2009).

Phase de mise en Œuvre :

La terre crue est un matériau adapté pour des applications structurelles et isolantes. Elle est souvent appliquée directement sous forme de briques compressées, de murs en pisé ou avec la technique de la bauge. Les constructions en terre crue sont souvent réalisées à l'aide de matériaux naturels tels que du bois pour le pisé par exemple (Belarbi et al., 2022).

Phase de fin de vie :

La terre crue présente un avantage écologique unique : elle est totalement recyclable et biodégradable (Blanquart et al., 2024). Lorsqu'un bâtiment en terre crue arrive en fin de vie, les éléments peuvent être démolis puis recyclés, réutilisés mais seulement si il n'y a pas eu d'ajout d'additifs (Blanquart et al., 2024). La terre crue peut être réutilisée pour de nouvelles constructions ou remise dans son environnement d'origine sans produire de déchets, ce qui en fait un matériau recyclable à l'infini (Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024; Minke, 2009).

Services écosystémiques

Services environnementaux (sol, eau, air)

- Régulation du climat et réduction de l'empreinte carbone

La terre crue participe activement à la régulation du climat grâce à son faible impact environnemental. Ne nécessitant ni cuisson ni transport sur de longues distances, sa mise en œuvre sur site réduit considérablement les émissions de CO₂ (Minke, 2006 ; Blanquart et al., 2024). Sa production consomme également beaucoup moins d'énergie que celle des matériaux industriels, contribuant ainsi à une baisse significative de l'empreinte carbone du bâtiment (Blanquart et al., 2024; Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024).

- Conservation des ressources

L'utilisation de la terre crue contribue à la conservation des ressources naturelles. En effet, elle permet de valoriser les terres d'excavation, réduisant ainsi le besoin d'extraire de nouvelles ressources (Blanquart et al., 2024). Elle s'inscrit également dans une économie circulaire comme elle est réutilisable à l'infini (Blanquart et al., 2024; Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024; Minke, 2009).

Services sociaux

La terre crue ne rend pas de services sociaux.

Services économiques

- Approvisionnement en matériaux durables

La terre crue est une ressource locale, naturelle et renouvelable, disponible en grande quantité dans de nombreuses régions. Son extraction et sa mise en œuvre peuvent se faire directement sur site, limitant ainsi les besoins en transport et en transformation industrielle (Doat et al., 1979).

- Faible coût

Grâce à sa disponibilité abondante et constante, la terre crue est un matériau accessible à tous, ce qui en fait une solution de construction particulièrement économique.

Services culturels

- Valorisation de techniques ancestrales

La terre crue contribue également à la préservation et à la mise en valeur du patrimoine architectural et des savoir-faire traditionnels.

Propriétés structurales en tant que matériau de construction

- Résistance mécanique

La principale caractéristique structurale de la terre crue réside dans sa **bonne résistance à la compression** (Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024; Mango-Itulamy & Fagel, 2022; Ren & Kagi, 1995). Cela en fait un matériau apte à supporter des charges verticales lorsqu'il est utilisé dans des éléments porteurs comme les murs.

Elle est en revanche **peu résistante à la flexion**, ce qui la rend inadaptée aux efforts horizontaux ou aux sollicitations sismiques sans renforts ou dispositifs complémentaires (Mango-Itulamy & Fagel, 2022; Ren & Kagi, 1995).

Les performances mécaniques varient considérablement selon la technique de mise en œuvre :

- Pisé, adobe, brique de terre comprimée (BTC) et bauge : Ces techniques reposent sur la compaction de la terre, plus ou moins humide selon le procédé. Grâce à cette densification, elles présentent une résistance à la compression satisfaisante pour des usages structurels (Doat et al., 1979).
- Torchis : Contrairement aux précédentes, cette technique nécessite un support porteur (ossature bois, treillis). La terre n'y joue qu'un rôle de remplissage ou de revêtement, sans fonction structurelle propre.

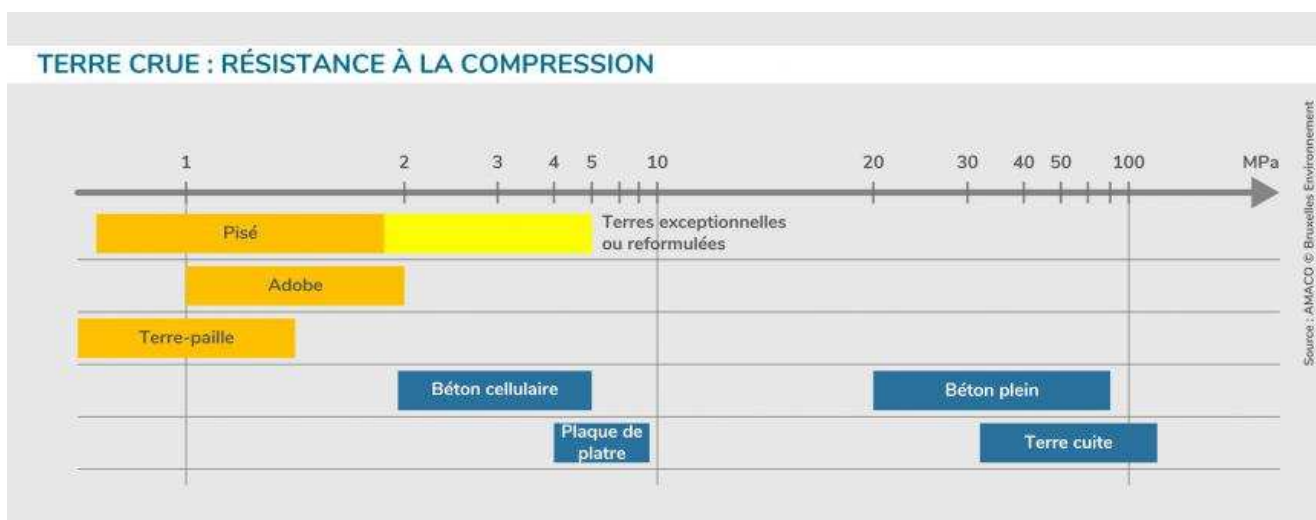


Figure 25 : Tableau de la résistance à la compression de la terre crue par rapport à d'autres matériaux.

Source : <https://guidebatimentdurable.brussels/construction-terre-crue>

- *Masse volumique*

La masse volumique de la terre crue varie généralement entre **1 200 et 2 250 kg/m³**, en fonction de la **technique de mise en œuvre utilisée** (fig.32).

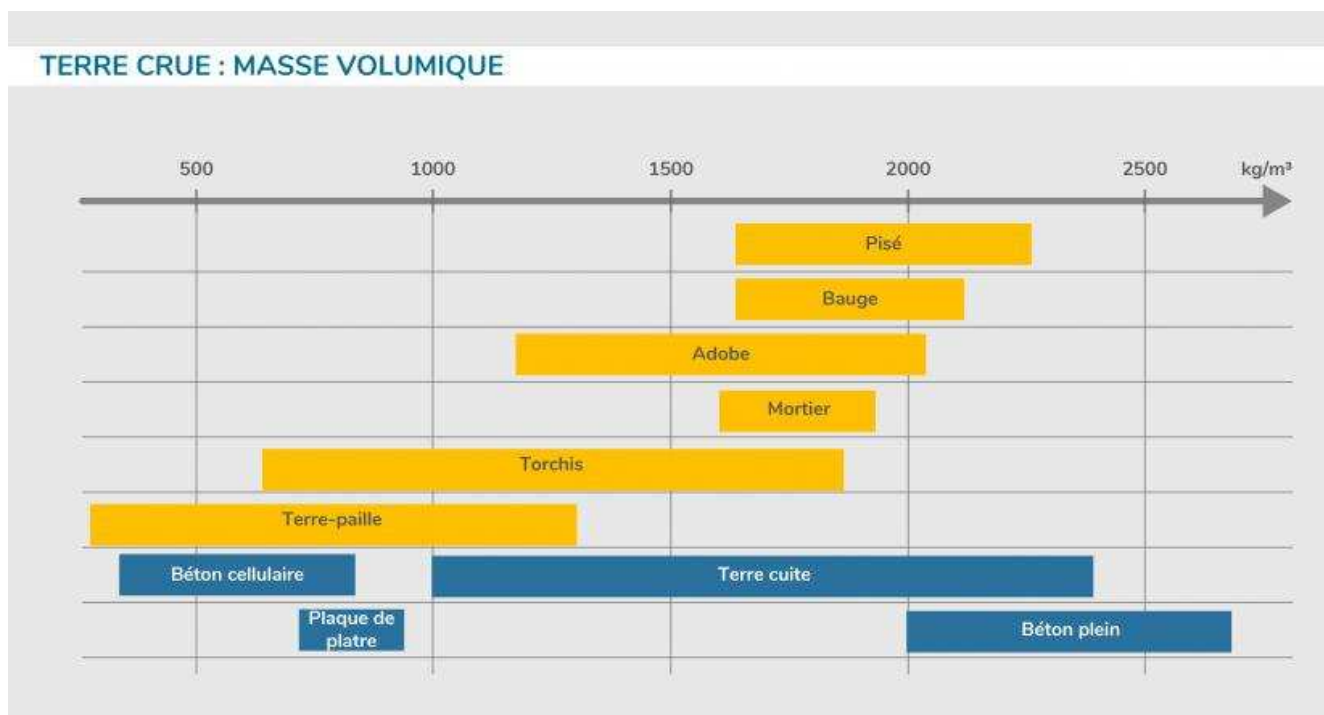


Figure 26 : Comparaison des masses volumiques des différents types de terre crue et de matériaux conventionnels.
Source : <https://guidebatimentdurable.brussels/construction-terre-crue>

- *Gonflement et rétrécissement*

La terre crue présente également une sensibilité à l'eau. En contact avec une forte humidité ou directement exposée à l'eau, elle gonfle ; à l'inverse, lorsque son apport en eau est insuffisant, elle se rétracte.

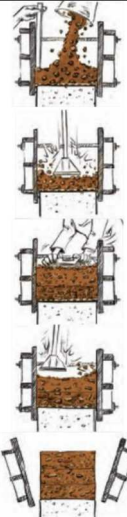
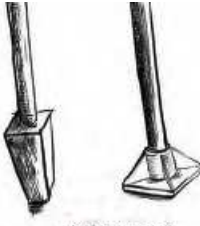


Pour faciliter son façonnage, la terre crue contient une certaine quantité d'eau. Cependant, une fois mise en place, elle perd cette humidité au cours du séchage, entraînant un retrait du matériau (Minke, 2009).

La terre crue n'est pas résistante à l'eau, ce qui explique pourquoi les constructions en terre crue utilisent des toitures débordantes pour protéger les façades des intempéries (Minke, 2009).

Pour contrer ce phénomène, il est possible d'ajouter des fibres. En effet, l'ajout de fibres permet de diminuer la quantité d'argile et donc, l'absorption de l'eau se fait également dans les pores des fibres (Minke, 2009).

Techniques de mise en œuvre

En construction, plusieurs techniques permettent d'utiliser la terre crue, telles que le pisé, l'adobe, le torchis ou encore la bauge (Doat et al., 1979; Minke, 2009). Chaque méthode utilise la terre crue de manière spécifique : le pisé consiste à compacter la terre dans des coffrages, l'adobe à façonner des briques séchées au soleil et la bauge à empiler des mottes de terre argileuse (Belarbi et al., 2022).

	Mise-en-œuvre	Schéma	Connecteur/ outillage	Usage
Le pisé	<p>La technique du pisé repose sur un système à comprimer de la terre crue humide entre des coffrages en bois, appelés banches (Doat et al., 1979). Ses fondations doivent être suffisamment épaisses et peuvent être réalisées en béton, en moellons ou en briques (Doat et al., 1979). Le coffrage est monté en couches successives et fixé entre elles par des entretoises ce qui formera un trou qui devra être bouché. Chaque couche de terre est solidement compactée et écrasée afin de former une paroi dense et solide (Doat et al., 1979; Losini et al., 2023; Minke, 2009). Afin d'assurer la cohésion entre la terre, celle-ci elle doit avoir une teneur en eau idéale (appelée teneur en eau optimale). (Minke, 2009).</p>	 <p>Figure 27 : Illustration de la mise-en-œuvre du pisé. Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).</p>	<p>Le compactage de la terre s'effectuait et s'effectue toujours par des outils qui s'appellent des béliers à tête conique en forme de coin ou à base plate (cf. figure 28). Il existe aujourd'hui une version de cet outil électrique appelé vérin (Minke, 2009).</p>  <p>PISOIRS MANUELS</p> <p>Figure 28 : Outil pour la mise-en-œuvre du pisé. Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).</p>	<p>Cette technique est utilisée pour faire des murs porteur par compactage en ne demandant pas de joint.</p>
L'adobe	<p>La terre crue est mélangée avec de la terre humide pour former une pâte qui est placée dans des coffrages en bois en forme de briques (rectangulaire) (Doat et al., 1979) et ensuite lissé soit à la main, soit avec un morceau de bois. Ces briques, appelées adobes, sont ensuite séchées à l'air libre, généralement au soleil, jusqu'à durcissement complet, environ trois mois (Doat et al., 1979). Une fois sèches, elles sont empilées avec un mortier en terre pour construire les murs (Doat et al., 1979; Minke, 2009).</p>	 <p>Figure 29 : Illustration de la mise-en-œuvre de l'adobe. Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).</p>	<p>Le connecteur est un mortier de terre et pour sa mise-en-œuvre, demande un moule en bois.</p>  <p>Figure 30 : Moule pour la mise-en-œuvre de l'adobe. Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).</p>	<p>Cette technique est utilisée pour faire des murs porteur par empilement et nécessite un joint de liaison.</p>

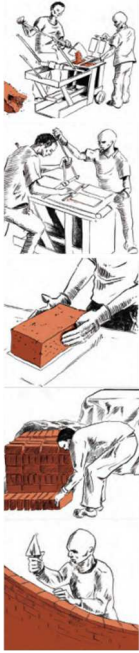

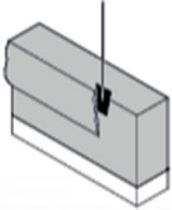
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Brique de terre compressée</p>	<p>Les BTC peuvent être façonnées à la main ou de manière mécanique. Lorsqu'elles sont façonnées à la main, la terre est placée dans un moule rectangulaire et compactée à l'aide d'un outil de compactage (Doat et al., 1979). Lorsqu'elles sont faites mécaniquement moyennant une presse, celle-ci peut être manuelle, mécanique, hydraulique ou encore pneumatique (Doat et al., 1979).</p>	 <p>Figure 31 : Illustration de la mise-en-œuvre de la BTC. Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).</p>	<p>Le connecteur est un mortier de terre.</p>	<p>Cette technique est utilisée pour faire des murs porteurs par empilement et nécessite un joint de liaison.</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">La bauge</p>	<p>La technique de la bauge consiste à empiler de grandes masses de terre crue, généralement à la main, en laissant chaque couche sécher partiellement avant d'ajouter la suivante, afin de permettre à la structure de se stabiliser progressivement (Minke, 2009). Il est nécessaire que la terre ait une consistance suffisamment plastique pour faciliter la mise en œuvre (Doat et al., 1979). Le soubassement des constructions en bauge sont plus large que le mur. Posé sur celui-ci, les murs sont un peu plus épais et de l'ordre de 15 à 30 centimètres tandis qu'en haut du bâtiment, l'épaisseur se réduit entre 5 à 15 centimètres (Doat et al., 1979).</p>	 <p>Figure 32 : Illustration de la mise-en-œuvre de la bauge. Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).</p>	<p>Cette technique ne nécessite que très peu d'outillages. En effet, les murs sont taillés soit avec un outil tranchant, soit avec une bêche.</p>  <p>Figure 33 : Outil bêche pour la mise-en-œuvre de la bauge. Source : Document PDF reçu, TERRA Award ©, Pauline Sémon (ill.), Dominique Gauzin-Müller (textes).</p>	<p>Cette technique est utilisée pour faire des murs porteurs par compactage en ne demandant pas de joint.</p>

Figure 34 : Tableau explicite des différentes techniques en terre crue.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

L'objectif n'est pas de dresser un inventaire exhaustif de toutes les techniques de mise en œuvre de la terre crue. À cet égard, les ouvrages "Construire en terre" (Doat et al., 1979) et "Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture" (Minke, 2009) présentent déjà des référentiels détaillés des différentes méthodes d'application.

Réversibilité des constructions en terre crue

La terre crue est un matériau de construction naturellement réversible, ce qui signifie qu'elle peut être démontée, réemployée ou réintégrée dans l'environnement sans perte majeure de ses qualités. Il suffit de l'humidifier, de la compacter, de la modeler ou de la mouler pour la réutiliser. L'argile, qui agit comme un liant naturel, assure la cohésion du matériau en prenant prise lors du séchage. Cette propriété permet de déconstruire les ouvrages en terre sans produire de déchets ultimes : les éléments (adobes, blocs de terre comprimée, pisé) peuvent être broyés, remélangés pour de nouvelles constructions, ou simplement rendus à la terre sans impact environnemental (Doat et al., 1979). La terre crue représente ainsi un matériau d'une circularité exemplaire.

Toutefois, l'ajout de stabilisants tels que le ciment, parfois utilisé pour renforcer la résistance à l'eau ou à la compression, compromet cette réversibilité : la terre stabilisée devient alors irréversible et ne peut plus être intégrée directement au cycle naturel.

Propriétés physiques du bâtiment

Conductivité thermique

Définition : La conductivité thermique (λ) mesure la quantité de chaleur qui traverse un matériau lorsque la différence de température entre ses deux côtés est de 1°C. Si sa conductivité thermique est élevée, il conduit facilement la chaleur.

La terre crue présente une conductivité thermique comprise entre $\lambda \approx 0,46$ et $0,93$ W/m.K (Houben et al., 2006). Ces valeurs varient selon la technique de mise en œuvre utilisée, sa densité et son taux d'humidité. Grâce à cette conductivité relativement faible, la terre crue agit comme un correcteur thermique naturel (Giada et al., 2019).

Elle contribue ainsi à maintenir des conditions intérieures stables, offrant une sensation de confort aussi bien en hiver qu'en été (Minke, 2009).

Pour améliorer ses capacités isolantes, il est possible d'y incorporer des agrégats légers (particules végétales, fibres, minéraux poreux), ce qui abaisse encore sa conductivité thermique (Minke, 2009).

Inertie thermique

Définition : Capacité à emmagasiner puis restituer de la chaleur.

La terre crue possède une excellente inertie thermique. Elle absorbe la chaleur en journée pour la restituer progressivement la nuit, un phénomène appelé effet de déphasage thermique. Ce mécanisme permet de stabiliser les températures intérieures et d'assurer un confort thermique constant (Binici et al., 2007).

Capacité hygrométrique :

Définition : Capacité de réguler l'humidité.

La terre crue, étant un matériau poreux et hygroscopique, a une capacité d'absorber l'humidité ambiante et de la désorber dans l'air. L'efficacité de cette régulation d'humidité dépend de la vitesse d'absorption et de désorption du matériau (Binici et al., 2007; Giada et al., 2019; Minke, 2009). Comparée à la terre cuite, elle est plus efficace pour absorber l'humidité (Minke, 2009). Cela participe à l'équilibre hygrothermique intérieur, contribuant ainsi à maintenir un environnement sain et confortable.

Isolation phonique :

Les matériaux en terre crue, comme le pisé, la bauge et l'adobe, se distinguent par une densité proche de celle du béton ou de la terre cuite, ce qui leur confère des performances similaires en matière d'isolation acoustique

face aux bruits extérieurs. Etant un matériau qui a comme propriété une finition rugueuse quand elle n'est pas lissée, cela permet d'augmenter la capacité à absorber les sons (Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024).

Pour plus d'information à ce sujet, le livre *Building with earth : Desing and technology of a Sustainable Architecture* de Minke (Minke, 2009) et le livre *Traité de construction en terre* de CRATerre (Houben et al., 2006) en parle très précisément.

Normes et réglementations

	Briques crues	Mortier de terre crue	Enduit de terre crue / Enduit d'argile
Allemagne	DIN 18945 + DIN 18940	DIN 18946 + DIN18940	DIN 18947
France	XP P13-901 (2001 – révision profonde article v2020)	Absente	Absente
Belgique	Absente	Absente	En cours d'élaboration par Buildwise + NIT 284

Figure 35 : Normes et réglementations de la terre crue.

Source : <https://guidebatimentdurable.brussels/construction-terre-crue>

Ce manque de normes et de réglementations peut s'expliquer par le grand intérêt des constructions avec des matériaux lourds ce qui a sans doute freiné son développement. Tout d'abord, sa compétitivité sur le marché reste un défi, notamment en raison du coût souvent élevé de la matière et de l'exécution, particulièrement pour des techniques spécifiques comme le pisé ou le torchis. Ces méthodes, bien que efficaces, nécessitent des compétences spécialisées qui augmentent les coûts. Enfin, sa résistance limitée à l'eau constitue une contrainte majeure, nécessitant des précautions spécifiques pour les protéger des intempéries ou des environnements humides. Malgré ces limitations, les qualités environnementales et les services rendus par la terre crue en font un matériau prometteur pour la construction durable (Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024; Houben et al., 2006).

Conclusion

En conclusion, la terre crue représente un matériau de construction aux multiples atouts, à la fois pour ses qualités écologiques et pour ses propriétés structurelles et hygrothermiques. Depuis l'extraction jusqu'à la fin de vie, elle s'inscrit dans un cycle durable, avec une faible empreinte carbone et une capacité de recyclage complète, la rendant compatible avec les objectifs de construction écologique.

De par ses propriétés de régulation thermique et d'humidité, la terre crue contribue au confort intérieur des bâtiments tout en participant à une gestion efficace des ressources et à une réduction de l'impact environnemental. Ses différentes techniques de mise en œuvre, du pisé à l'adobe en passant par le torchis et la bauge, illustrent la flexibilité d'un matériau ancré dans les traditions.

Face aux défis climatiques actuels, la terre crue se révèle être une alternative face aux matériaux industriels, capable de répondre aux besoins d'une architecture durable, résiliente et respectueuse de l'environnement (Doat et al., 1979).

TABLEAU DE SYNTHÈSE – TERRE CRUE	
SERVICES ECOSYSTEMIQUES	<p>Régulation du climat et réduction de l'empreinte carbone : Moins d'énergie requise comparée à d'autres matériaux de construction, absence de cuisson.</p> <p>Conservation des ressources : Valorisation des terres d'excavation, réduction de l'extraction de nouvelles ressources.</p> <p>Approvisionnement en matériaux durable : ressource locale, naturelle et renouvelable, disponible en grande quantité.</p> <p>Faible coût : disponibilité abondante.</p> <p>Valorisation de techniques ancestrales : matériau utilisé depuis des millénaires.</p>
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	<p>Bonne résistance à la compression</p> <p>Faible résistance en flexion</p>
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	<p>Régulation thermique : Maintien d'une température stable à l'intérieur des bâtiments, réduction des besoins en climatisation.</p> <p>Agit comme un correcteur thermique : une conductivité thermique comprise entre $\lambda \approx 0,46$ et $0,93$ W/m.K</p> <p>Régulation hygrométrique : Matériau poreux absorbant et restituant l'humidité de l'air.</p> <p>Isolation phonique : Bonne absorption acoustique.</p>

Figure 36 : Tableau de synthèse sur les propriétés de la terre crue.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

A large, stylized number '3' in a brown color, positioned on the right side of the page. It has a thick, rounded stroke and a white interior.

Chapitre 3 :

La pierre massive : un
matériau brut au service
de l'architecture durable

Introduction

La pierre massive est un matériau de construction naturel, utilisé depuis des millénaires dans le domaine de la construction (Le Dréan & Kuratli, 2022). Issue directement des carrières, elle se caractérise par sa densité, sa durabilité et sa résistance. C'est un matériau de construction ancestral (Le Dréan & Kuratli, 2022) qui est apparu après la Seconde Guerre Mondiale en 1940-1945. Ce matériau n'a pas été valorisé lors de la reconstruction massive en raison de l'urgence liée à la pénurie de logements et de l'attrait croissant envers le béton. Durant cette période, l'essor du béton et des techniques de construction lourde captait l'attention, en raison de ses qualités de rapidité et de modularité, adaptées aux besoins de l'époque (Le Dréan & Kuratli, 2022). Jusqu'en 1954, de nombreux architectes ont eu l'occasion de réaliser un ensemble de logements notamment grâce à l'invention de la pierre prétaillée. Mais celle-ci n'a eu qu'un instant de gloire car à ce moment-là, le béton et la construction lourde étaient au cœur des préoccupations (Le Dréan & Kuratli, 2022).

En parallèle à cela, Fernand Pouillon, architecte visionnaire des années 1950, a marqué son époque par son approche novatrice en matière de construction massive. Alors que la majorité des professionnels et du public se souciaient peu des impacts environnementaux que pouvait causer la construction, Pouillon s'est démarqué par une réflexion en avance sur son temps, cherchant à concilier durabilité et qualité des matériaux (Tehami & Anouche, 2017). En effet, pour répondre aux besoins de standardisation en vogue à son époque, il a adapté ce principe à la pierre massive en introduisant un processus où les pierres étaient préalablement taillées selon des dimensions standardisées. Ces éléments standard permettaient une meilleure uniformité et simplifiaient l'assemblage de la pierre massive. Cette approche permettait de gagner en rapidité et en étant compatible avec les exigences modernes de l'architecture de l'époque (Pressacco & Barrault, 2018).

Aujourd'hui, on observe un intérêt croissant, mais encore discret, pour la pierre massive (Didelon, 2020 ; Tourneur, 2022). Cette résurgence est portée par une recherche accrue de matériaux durables et respectueux de l'environnement, en phase avec des exigences contemporaines de faible empreinte carbone (Laurent, 2011).

En effet, ce matériau, taillé en blocs est particulièrement apprécié pour ses propriétés mécaniques ainsi que pour sa capacité à traverser le temps sans perdre ses qualités.

À elle seule, elle permet d'offrir une esthétique variée grâce à sa large palette de couleurs. Compte tenu de la grande diversité de pierres existantes, cette étude se concentre sur **les roches sédimentaires**, en particulier le calcaire et le grès, qui sont couramment utilisés en construction.

L'utilisation de la pierre massive dans la construction repose sur des techniques variées qui exploitent la nature, le poids et la densité de la pierre, permettant de tirer parti de ses propriétés structurelles pour façonner des constructions solides et résistants aux intempéries.

Cycle de vie

- *Phase d'extraction*

L'extraction de la pierre massive s'effectue dans les carrières, où des blocs de pierre sont détachés à l'aide de techniques de forage, de dynamitage ou de sciage (Laurent, 2011). Ces méthodes peuvent nécessiter une quantité considérable d'énergie et avoir un impact sur le paysage environnant mais cela est la seule transformation du matériau (Pressacco & Barrault, 2018).

- *Phase de transformation*

Une fois extraits, les blocs de pierre sont transportés vers des sites où ils sont taillés et façonnés en fonction des spécifications du projet de construction. Dans certains cas, les blocs de pierre sont directement taillés dans la carrière. Cette étape comprend le sciage, le façonnage et éventuellement le traitement de surface pour obtenir la forme et les dimensions souhaitées (Laurent, 2011). Ensuite viennent les finitions, qui transforment le matériau en un objet prétaillé (Pressacco & Barrault, 2018).

- *Phase de mise en œuvre,*

La pierre transformée est acheminée vers le chantier où elle est mise en œuvre. Cette phase inclut l'assemblage des blocs et leur intégration dans la structure. Dans certains projets, la pierre est taillée directement sur le chantier pour des ajustements fins. Cette étape peut être nécessaire pour des finitions spécifiques ou pour s'adapter aux particularités du bâtiment (Laurent, 2011).

- *Phase de fin de vie*

À la fin de son utilisation, la pierre massive peut être réutilisée dans de nouveaux projets, recyclée, ou réintégrée dans l'environnement sans générer de pollution majeure. Ce matériau a un très grand caractère circulaire (CTMNC & UNTEC, 2015 ; Pressacco & Barrault, 2018).

Services écosystémiques

Services environnementaux (sol, eau, air)

- *Conservation des ressources*

La pierre massive permet une utilisation raisonnée des ressources naturelles grâce à sa durabilité exceptionnelle et sa capacité à être réemployée. Son cycle de vie prolongé réduit la nécessité de produire de nouveaux matériaux, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles (Pressacco & Barrault, 2018).

- *Réduction de l'empreinte carbone*

La pierre massive présente une faible empreinte carbone, notamment grâce à son extraction locale, qui limite les besoins en transport, et à sa transformation réduite, consistant généralement à tailler les blocs (Pressacco & Barrault, 2018). Durable et réutilisable, elle s'inscrit dans une logique écologique en réduisant les impacts environnementaux liés à la construction (Laurent, 2011).

Services sociaux

La pierre massive ne rend pas de services sociaux.

Services économiques

- Approvisionnement en matériaux durables

La pierre massive est une ressource naturelle locale, souvent disponible en abondance. Sa capacité à être réutilisée ou recyclée en fait un matériau durable, idéal pour une économie circulaire et des constructions écologiques (Pressacco & Barrault, 2018).

Services culturels

- Valorisation de techniques ancestrales

La pierre massive, utilisée depuis des siècles, connaît aujourd'hui un regain d'intérêt, réactivant ainsi des savoir-faire traditionnels.

Propriétés structurales en tant que matériau de construction

- Résistance mécanique

La pierre sédimentaire, notamment le calcaire et le grès, se caractérise par un poids relativement élevé, avec une masse volumique comprise entre **1300 et 2700 kg/m³** (Laurent, 2011). Cette densité contribue à sa **bonne résistance à la compression**, qui varie de **5 à 275 MPa** (CTMNC & UNTEC, 2015), faisant d'elle un matériau structurel performant (Le Dréan & Kuratli, 2022).

En revanche, sa **résistance à la flexion** reste plus faible, avec des valeurs comprises entre **2 et 17 MPa** (CTMNC & UNTEC, 2015). Par ailleurs, la pierre sédimentaire présente une porosité variable, oscillant entre **0,3 et 48 %**, influençant ainsi ses performances mécaniques et sa durabilité (CTMNC & UNTEC, 2015).

Les pierres peuvent être classées selon leur résistance à la compression :

- **Pierres tendres** : résistance inférieure à **10 MPa**,
- **Pierres fermes** : entre **10 et 40 MPa**,
- **Pierres dures** : au-delà de **40 MPa** (CTMNC & UNTEC, 2015).

Cette classification de pierre, très répandue en France, reste peu utilisée en Belgique. En effet, il est vrai que la résistance du matériau dépend de bien d'autres facteurs telle que la taille, le type de roche, sa provenance, etc.

La **capacité portante** de la pierre dépend de l'épaisseur et de la hauteur du mur porteur : plus le mur est épais, plus il est capable de supporter des charges importantes (Laurent, 2011).

Techniques de mise en œuvre

La mise en œuvre de la pierre massive dans la construction peut se faire de différentes manières, selon les besoins du projet. Elle peut être utilisée pour construire des murs porteurs, des fondations ou encore des colonnes structurales. L'élaboration d'un mur en pierre massive relève d'un savoir-faire et d'un calepinage afin de former une unité (Laurent, 2011).

Afin de faciliter la construction, certaines pierres massives sont prétaillées dans un atelier (Pressacco & Barrault, 2018), puis transportées sur le chantier pour y être montées. Cela permet un gain de temps sur le chantier mais nécessite une logistique de transport robuste.

Description des éléments présents dans le tableau ci-après:

- **Le mur en pierres sèches**

Cette technique ancestrale consiste à empiler des pierres sans utiliser de mortier pour les lier. La stabilité de l'ouvrage est assurée par un ajustement précis des pierres.

- **L'assemblage par mortier**

Ce mortier comble les espaces entre les pierres, stabilise la structure, et permet l'utilisation de pierres de formes irrégulières. Cette technique assure une bonne cohésion de l'ensemble tout en apportant une certaine flexibilité dans le choix des matériaux. C'est également la technique la plus courante. Cet assemblage utilise le poids de la pierre massive afin d'assurer une cohésion entre chaque éléments (Laurent, 2011).

- **Construction standardisée**

La construction en pierre massive, au-delà des techniques de mise en œuvre, repose sur des modules et des méthodes standardisées, prétaillées (Le Dréan & Kuratli, 2022). Les blocs de pierre adoptent généralement des dimensions standard de *210 cm de longueur, 90 cm de hauteur et 50 cm d'épaisseur* (cf. figure 38). Toutefois, il est bien entendu possible de réaliser des pièces sur mesure pour répondre aux besoins spécifiques d'un projet (Laurent, 2011).

Selon le géologue belge Francis Tourneur, en Belgique, les carrières wallonnes peinent à fournir des blocs standardisés de grandes dimensions, comme le montre la figure 35. Cela est dû à plusieurs facteurs : les bancs ou strates de pierre ont des hauteurs limitées, le poids des éléments (les roches en Belgique ayant généralement une masse volumique d'environ 2700 kg/m^3), ainsi que la difficulté relative à débiter et façonner de telles pièces (Francis Tourneur, communication personnelle, 7 avril 2025).

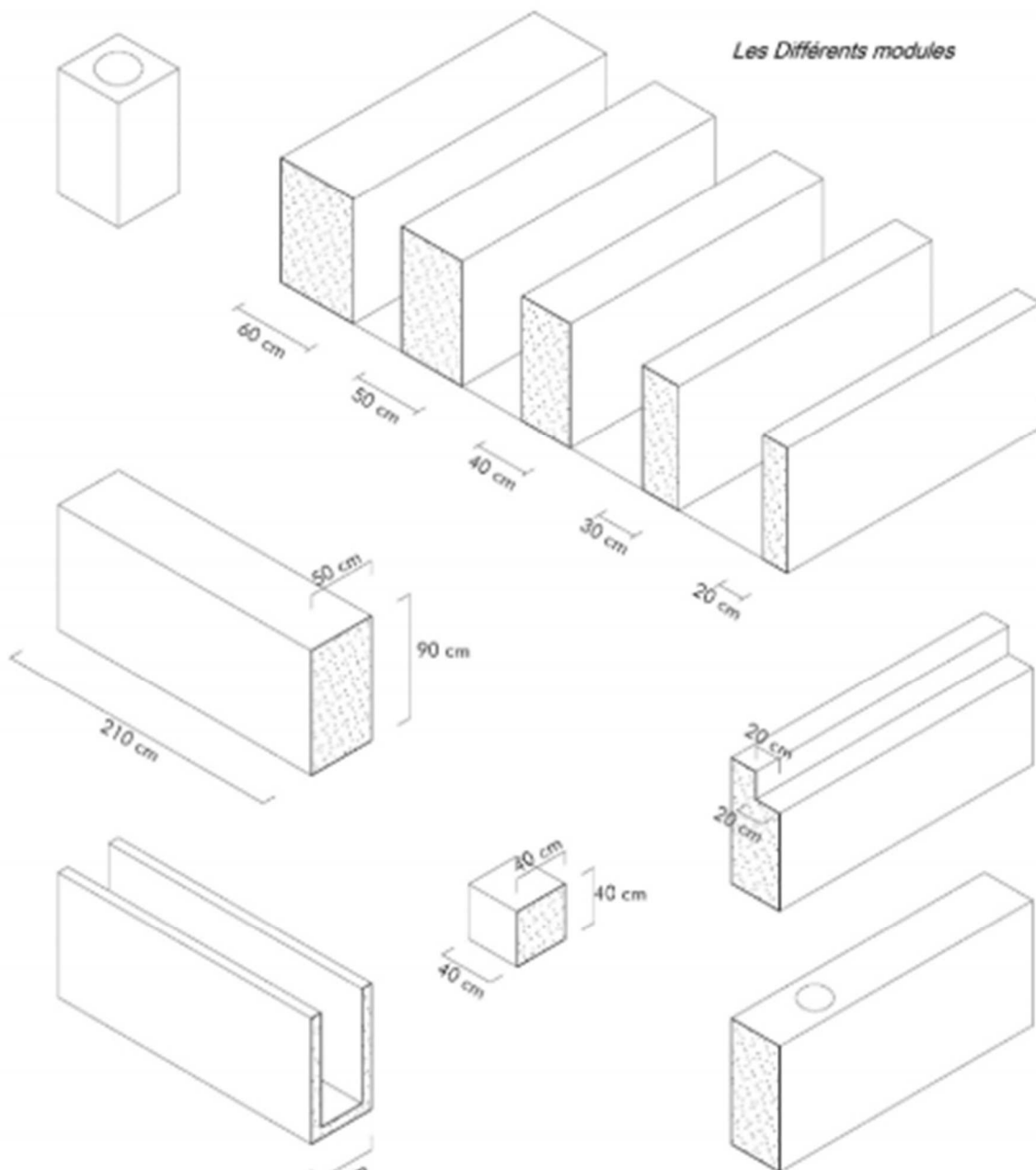


Figure 37 : Standardisation des blocs de pierre.
 Source : <https://www.pierremassive.com/guides-techniques>

- Le calpinage :

Le calpinage consiste à planifier l'agencement des pierres afin d'assurer un assemblage stable et cohérent. Avant la construction, un plan détaillé est réalisé pour organiser la disposition des blocs en fonction de leur taille et de leur forme. Cette anticipation permet d'optimiser l'utilisation des matériaux et d'éviter un assemblage désordonné (Laurent, 2011).

- Joint

Les joints dans la construction en pierre massive jouent un rôle essentiel dans l'assemblage des blocs de pierre. Leur fonction va bien au-delà de l'aspect esthétique ; ils assurent la stabilité, l'étanchéité, et la résistance de la structure (Laurent, 2011).

Types de joints

Joints verticaux : Ce sont les joints entre les pierres positionnées verticalement. Ils permettent une flexibilité pour absorber les mouvements de la structure et ainsi de permettre une meilleure étanchéité tant à l'air qu'à l'eau (Lambertie, 1965).

Joints horizontaux : Les joints entre les pierres posées horizontalement assurent la continuité du calepinage. L'épaisseur est comprise entre 4 et 15 mm (Le Dréan & Kuratli, 2022).

Traditionnellement, les joints entre les blocs de pierre massive sont remplis avec un mortier à base de chaux ou de ciment (Laurent, 2011).

- Techniques de jointoiment et de rejointoiment

Les blocs de pierre massive sont assemblés à l'aide d'un lit de mortier lors de la construction du mur. Une fois celui-ci terminé, le rejointoiment consiste à refaire ou renforcer les joints entre les blocs de pierre (Laurent, 2011). Cette étape permet de restaurer l'étanchéité et d'améliorer la stabilité. Le rejointoiment permet d'obtenir une surface lisse et continue entre les blocs de pierre, avec une épaisseur de joint d'environ 1 cm (Laurent, 2011).

Ce tableau, issu de mon analyse, présente une échelle d'adaptabilité :

- X Non adapté
- ✓ Adapté

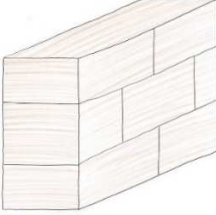
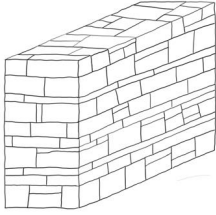
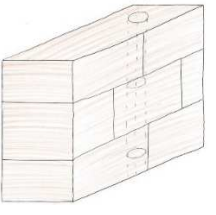
Type	Assemblage par mortier	Construction standardisée	Nécessité de calepinage	Joint
<p>Pierre taillée</p>  <p><small>Figure 38 : Schéma d'assemblage en pierre taillée. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</small></p>	<p>✓ Avec soit un mortier de chaux ou de ciment.</p>	<p>✓ les blocs sont souvent prétaillés en atelier pour une mise en œuvre rapide et précise sur chantier</p>	<p>✓ indispensable pour assurer l'alignement et l'optimisation des découpes</p>	<p>✓ Présence de joints minces et réguliers</p>
<p>Pierre sèche, moellon</p>  <p><small>Figure 39 : Schéma d'assemblage en pierre sèche. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</small></p>	<p>X Ne nécessite pas de mortier.</p>	<p>✓&X La taille des moellons est très souvent variable et n'est pas taillée ou très peu mais peut-être standardisée pour favoriser la mise-en-œuvre.</p>	<p>X Les moellons sont posés de manière plus libre.</p>	<p>X Ne nécessite pas de joint.</p>
<p>Maçonnerie chaînée</p>  <p><small>Figure 40 : Schéma d'assemblage en maçonnerie chaînée. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</small></p>	<p>✓ Avec soit un mortier de chaux ou de ciment.</p>	<p>✓ les blocs sont souvent prétaillés en atelier pour une mise en œuvre rapide et précise sur chantier</p>	<p>✓ Pour optimiser la répartition des charges et l'intégration des armatures</p>	<p>✓ Présence de joints minces et réguliers</p>

Figure 41 : Tableau de synthèse sur les mises en œuvre de la pierre massive.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Réversibilité des constructions en pierre massive :

La pierre massive est un matériau extrêmement durable avec un impact limité (Tourneur, 2022), dont la réversibilité en construction dépend essentiellement de la méthode de mise en œuvre. Lorsqu'elle est assemblée à sec ou à l'aide de mortiers réversibles, comme ceux à base de chaux, elle peut être démontée, nettoyée et réemployée sans perte significative de ses propriétés mécaniques.

Cependant, lorsque la pierre est maçonnerie avec du mortier de ciment, sa réversibilité est fortement compromise. De plus, si le mortier est plus rigide que la pierre elle-même, il risque d'entraîner des ruptures et des détériorations du matériau lors de la déconstruction (Tourneur, 2022). À l'inverse, un mortier plus souple que la pierre peut permettre un démontage plus aisé.

Propriétés physiques du bâtiment

Conductivité thermique

La conductivité thermique de la pierre massive dépend du type de roche et de sa densité, mais de manière générale, elle est plus élevée que celle des matériaux isolants ou de la terre crue. Voici quelques valeurs indicatives pour une pierre calcaire :

- Pierre calcaire : $\lambda \approx 0,60$ à $1,30$ W/m.K (Pestre, 2021).
- Grès : $\lambda \approx 1,90$ à $2,60$ W/m.K (Ecobati, s. d.).

En conclusion, la conductivité thermique des pierres naturelles varie de moyenne à mauvaise selon le type de pierre. Certaines pierres calcaires atteignent des valeurs proches de $\lambda \approx 0,60$ W/m.K, ce qui reste supérieur à celles des matériaux isolants (généralement autour de $\lambda \approx 0,07$ W/m.K). Bien que cette valeur puisse être considérée comme « moins mauvaise » dans le contexte des matériaux massifs, la pierre ne peut en aucun cas être qualifiée de matériau isolant. Cependant, sa forte inertie thermique permet de compenser en partie cette faible performance isolante. En effet, la pierre contribue à stabiliser les variations de température intérieure, ce qui en fait un matériau intéressant.

Inertie thermique

La pierre massive possède une excellente inertie thermique : elle emmagasine la chaleur et la restitue progressivement (Le Dréan & Kuratli, 2022), cela permet d'avoir une température stable ce qui évite les potentielle surchauffe en été (Pressacco & Barrault, 2018) et un confort en hiver (Didelon, 2020). Pour optimiser les performances d'une construction en pierre massive, il est essentiel de prendre en compte des facteurs tels que l'orientation, les flux de vent, les zones d'ombre, et d'autres éléments environnementaux (Laurent, 2011). Il est également important de noter que plus l'épaisseur d'un matériau est importante, meilleure sera sa capacité d'isolation (Didelon, 2020).

Capacité hygrométrique

La pierre joue un rôle essentiel comme régulateur hygrothermique dans les bâtiments. Cette capacité dépend de la porosité et de l'hygroscopicité de la pierre. Celle-ci permet de capter l'humidité de l'air lorsque celle-ci est excessive et de la restituer lorsque l'air devient trop sec. Ce phénomène naturel contribue à maintenir un taux d'humidité stable à l'intérieur. Il offre un confort d'été et un confort d'hiver (Laurent, 2011).

Isolation phonique

La pierre massive, en raison de sa grande densité, possède une excellente capacité d'absorption des ondes sonores. Cette propriété permet de limiter la propagation du bruit à l'intérieur des bâtiments et d'atténuer les nuisances provenant de l'extérieur. En réduisant la réverbération et en absorbant les vibrations sonores, ce matériau permet d'améliorer le confort acoustique (CTMNC & UNTEC, 2015).

Normes et réglementations

En Belgique, la construction en pierre naturelle est régie par des normes NBN-EN. Parmi les plus pertinentes, on trouve :

- NBN EN 771-6 : pour les blocs en pierre naturelle destinés à la maçonnerie,
- NBN EN 1469 : pour les dalles en pierre naturelle pour revêtements muraux,
- NBN EN 12058 : pour les dalles en pierre naturelle pour planchers,
- NBN EN 12371 : pour la résistance au gel,
- NBN EN 1926 : pour la résistance à la compression.

Ces normes sont disponibles en version complète et payante sur le site du Bureau de Normalisation (NBN, 2006), avec un descriptif sur le site de Buildwise (Buildwise, s. d.).

Conclusion

La pierre massive, utilisée depuis des siècles, s'impose aujourd'hui comme un matériau d'avenir pour l'architecture durable. Elle suscite un regain d'intérêt en raison de ses atouts écologiques (Didelon, 2020; Laurent, 2011). Ses propriétés en font un choix judicieux pour les constructions responsables : sa durabilité, sa capacité à être réemployée ou recyclée, ainsi que son faible impact environnemental. Naturelle, locale, et peu transformée, elle incarne une alternative respectueuse des ressources et en phase avec les enjeux environnementaux actuels (Laurent, 2011; Pressacco & Barrault, 2018).

Sa polyvalence structurelle, combinée à des qualités telles que l'inertie thermique, l'isolation acoustique et la régulation hygrométrique, offre des solutions adaptées à divers besoins (CTMNC & UNTEC, 2015). Ces caractéristiques permettent de répondre efficacement aux exigences de confort tout en respectant les performances énergétiques attendues.

TABLEAU DE SYNTHÈSE – PIERRE MASSIVE

SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES	Réduction de l'empreinte carbone : nécessite peu de transformation Conservation des ressources : ressource particulièrement durable Approvisionnement en matériaux durables : ressource naturelle Valorisation de techniques ancestrales : matériau utilisé depuis des millénaires
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	Bonne résistance à la compression Résistance en flexion plus faible
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	Conductivité thermique moyenne à mauvaise : Pierre calcaire $\lambda \approx 0,60$ à $1,30$ W/m.K et Grès : $\lambda \approx 1,90$ à $2,60$ W/m.K Bonne inertie thermique Bonne capacité hygrométrique mais cela dépend de la porosité de la pierre Isolation phonique, elle améliore le confort sonore

Figure 42 : Tableau de synthèse sur les propriétés de la pierre massive.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Chapitre 4 :

Conclusion de la partie I



À travers l'étude des propriétés physiques et mécaniques, des modalités de mise en œuvre, des assemblages, du cycle de vie et des services écosystémiques du bambou, de la terre crue et de la pierre massive, cette première partie a permis de **dresser un panorama complet** de **trois matériaux structurels** à fort potentiel **pour une architecture écoresponsable**. Chacun d'eux présente des caractéristiques singulières qui les rendent pertinents dans une approche contemporaine de la construction durable, tout en valorisant des ressources locales, peu transformées, et souvent issues de savoir-faire traditionnels.

Le bambou, avec sa croissance rapide, sa légèreté et sa flexibilité, se distingue par son faible impact environnemental et sa résistance mécanique. La terre crue, matériau ancestral par excellence, offre d'excellentes qualités thermiques et hygrothermiques. Quant à la pierre massive, elle incarne une solution pérenne et performante, à la fois en termes de durabilité, d'inertie et de réemploi. Tous trois permettent d'envisager des constructions sobres, réversibles et adaptées aux enjeux climatiques et environnementaux actuels.

Ces notions théoriques **posent les bases nécessaires** pour mieux **comprendre** comment ces matériaux **sont mis en œuvre dans des projets architecturaux**. La seconde partie du TFE s'appuie ainsi sur cette analyse préalable pour étudier différentes réalisations contemporaines où le bambou, la terre crue et la pierre massive sont utilisés de manière innovante et contextuelle. Elle permet de confronter les données techniques à la réalité du terrain, et d'interroger la manière dont les choix constructifs traduisent une démarche durable en pratique.

PARTIE II

Du matériau à l'architecture

Cette seconde partie analyse une série de projets architecturaux sélectionnés pour leur exploitation des matériaux présentés dans la première partie mais également pour les innovations constructives qu'ils proposent ainsi que l'utilisation intelligente des matières à bâtir. Cette partie, comme la précédente, est constituée de trois chapitres, chacun présentant un ensemble de projets architecturaux s'appuyant sur le bambou, la terre crue et enfin la pierre massive. Elle s'appuie sur l'étude préalable des techniques, des propriétés et du cycle de vie de ces matériaux.

L'analyse de ces différents projets permet de dresser un inventaire concret des applications architecturales offertes par ces trois matériaux, dans le but de mieux comprendre leurs potentialités et leurs limites dans le contexte de la construction.

La méthodologie d'analyse est systématique et s'établit sur plusieurs points d'étude :

- Les informations générales permettent de situer le projet dans son contexte, en précisant les lieux, dates, et concepteurs.
- Le contexte et les enjeux s'attachent à examiner les défis spécifiques et les objectifs poursuivis par l'architecte.
- L'approche écologique explore les aspects environnementaux et la contribution du projet à une architecture plus responsable.
- La fonctionnalité et confort évaluent les qualités pratiques et l'impact du matériau sur l'expérience des utilisateurs.
- L'aspect structurel et constructif qui aborde, quand cela est possible, les différentes couches d'une paroi du projet.

S'en suit une analyse de projets vernaculaires, permettant de mieux cerner les méthodes traditionnelles ou employées par les anciens dans la construction, lorsque ce secteur ne disposait pas des ressources technologiques et des moyens modernes dont nous bénéficions aujourd'hui. Cette étude permet de mettre en lumière les savoir-faire traditionnels, les techniques locales et les solutions pratiques développées pour répondre aux contraintes climatiques et structurelles.

La collecte des informations s'est faite à travers une approche combinant recherche documentaire et échanges directs avec les architectes des cas d'études. Cependant, le manque de données précises sur certains projets a rendu nécessaire l'utilisation de sources grises telles que des sites internet ou des blogs, pour recueillir des informations complémentaires. Dans certains cas, où les données étaient particulièrement lacunaires, les photos ainsi que les plans, détails constructifs ont servi de support pour déduire des éléments de la conception.



Chapitre 1 :

Construire avec le
Bambou

Introduction

Ce chapitre visait à explorer davantage de bâtiments construits à l'aide du bambou. Cependant, le manque de temps ainsi que la disponibilité limitée des informations et le manque de réactions de certains architectes ont compliqués cette démarche. Ainsi malgré leur intérêt et la volonté de les prendre en considération dans l'étude, les projets suivants n'ont pas pu être analysés :

- Blue Temple - Housing NOW
- Rama Estudio – Casa Toquilla
- SUP Atelier of THAD et One Lighting Studio of THAD – Marché aux feuilles de thé

NorthEast bamboo pavilion for Surajkund Craft Fair

AtArchitecture

- Localisation : Faridabad, Inde (Asie)
- Climat : Climat tropical
- Fonction : Pavillon d'exposition
- Surface totale : 420 m²
- Composition : plain-pied
- Matériau principal : Bambou
- Année de construction : 2023

Contexte et Enjeux :

Ce projet constitue un hommage à l'artisanat indien et à la richesse culturelle des États du nord-est du pays. Construit en seulement 60 jours, ce pavillon a été érigé avec la participation locale ainsi que des artisans locaux, démontrant le savoir-faire traditionnel et l'expertise technique du travail du bambou, un matériau couramment utilisé en Inde (ELLE DECOR, s. d.; Divisare, s. d.-b; FuturArc, 2024).

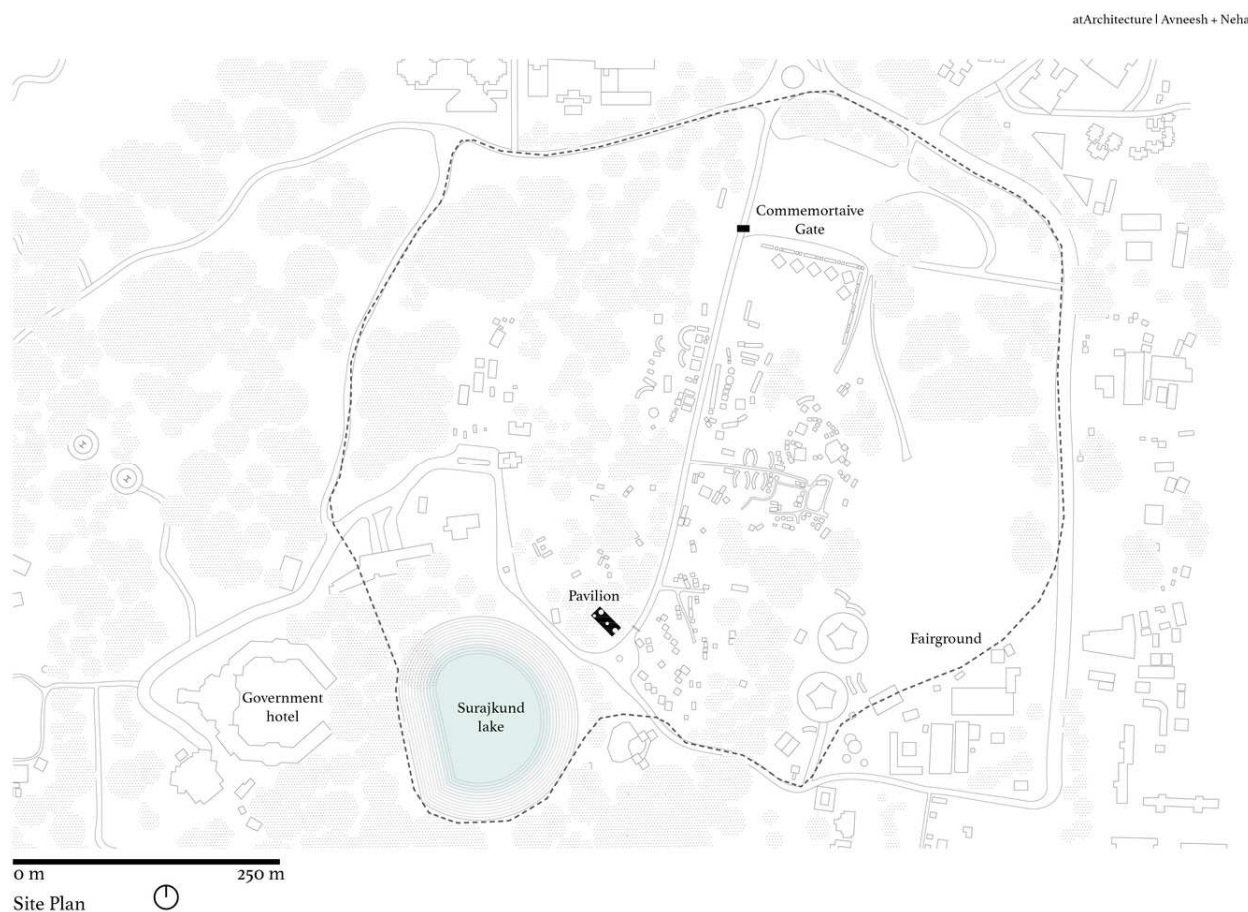


Figure 43 : Plan de site du Northeast Bamboo Pavilion.

Source : <https://www.archdaily.com/1012722/northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture/65c0e9a5f3424e66a469bf11-northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture-plan-site>



Figure 44 : Vue extérieure du Northeast Bamboo Pavilion. © Suryan & Dang.

Source : <https://www.archdaily.com/1012722/northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture/65c0e9a5f3424e66a469bf11-northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture-plan-site>.



Figure 45 : Vue du toit du Northeast Bamboo Pavilion. © Suryan & Dang.

Source : <https://www.archdaily.com/1012722/northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture/65c0e9a5f3424e66a469bf11-northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture-plan-site>.

Approche Écologique :

Le bambou a été travaillé selon des techniques locales pour renforcer l'identité culturelle du pavillon (ELLE DECOR, s. d.; Divisare, s. d.-b; FuturArc, 2024).

Fonctionnalité et Confort :

Conçu par le bureau d'architecture atArchitecture, le pavillon présente une structure ouverte avec huit galeries cylindriques reliées par un toit courbe, évoquant la topographie vallonnée de la région. Ce bâtiment a été imaginé afin d'accueillir la foire de l'artisanat organisée annuellement, où le métier à tisser est mis à l'honneur (ELLE DECOR, s. d.; Divisare, s. d.-b; FuturArc, 2024).



Figure 46 : Vue globale du Northeast Bamboo Pavilion. © Suryan // Dang.

Source : <https://www.archdaily.com/1012722/northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture/65c0e9a5f3424e66a469bf11-northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture-plan-site>.

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Élément porteur vertical et horizontal
- Espèce du bambou : Non spécifié
- Section du bambou : 75 mm & 50 mm
- Provenance du bambou : Locale

Le projet repose sur une semelle en béton, recouverte d'un sol en terrazzo (cf. figure 48).

La structure porteuse est constituée exclusivement de bambou. Deux sections ont été employées : des bambous de 75 mm de diamètre pour l'extérieur, et de 50 mm pour l'intérieur (cf. figure 48). La fixation des bambous à la dalle s'effectue depuis l'intérieur de ceux-ci : un tube en acier de 25 mm est inséré dans le creux du bambou, puis assemblé mécaniquement à l'aide d'un boulon. Pour assurer la stabilité, ce tube est lui-même noyé directement dans la semelle en béton.

La suite de la structure s'organise en ossature, combinant des bambous verticaux et horizontaux reliés par des assemblages modernes avec des boulons (cf. figure 47). Réalisés à sec, ces assemblages préservent l'intégrité du matériau.

La charpente de toiture est composée d'un premier lit de bambous disposés longitudinalement, puis d'un second lit transversal. Ces éléments sont fixés mécaniquement, probablement à l'aide de boulons. La couverture est ensuite réalisée en bardeaux de bambou, posés directement sur cette structure.

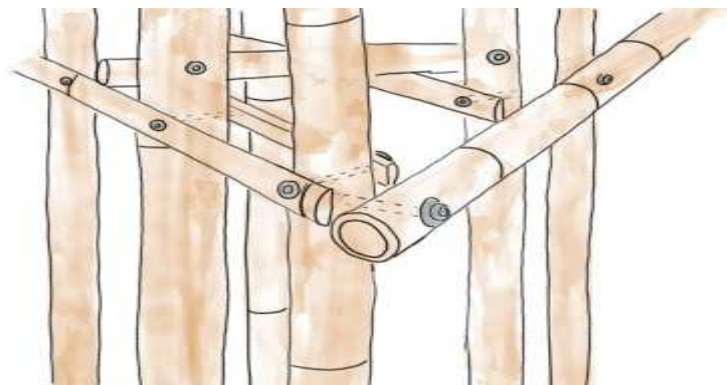


Figure 47 : Schéma des jonctions des bambous avec des boulons du projet NorthEast Bamboo Pavilion de atArchitecture.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.



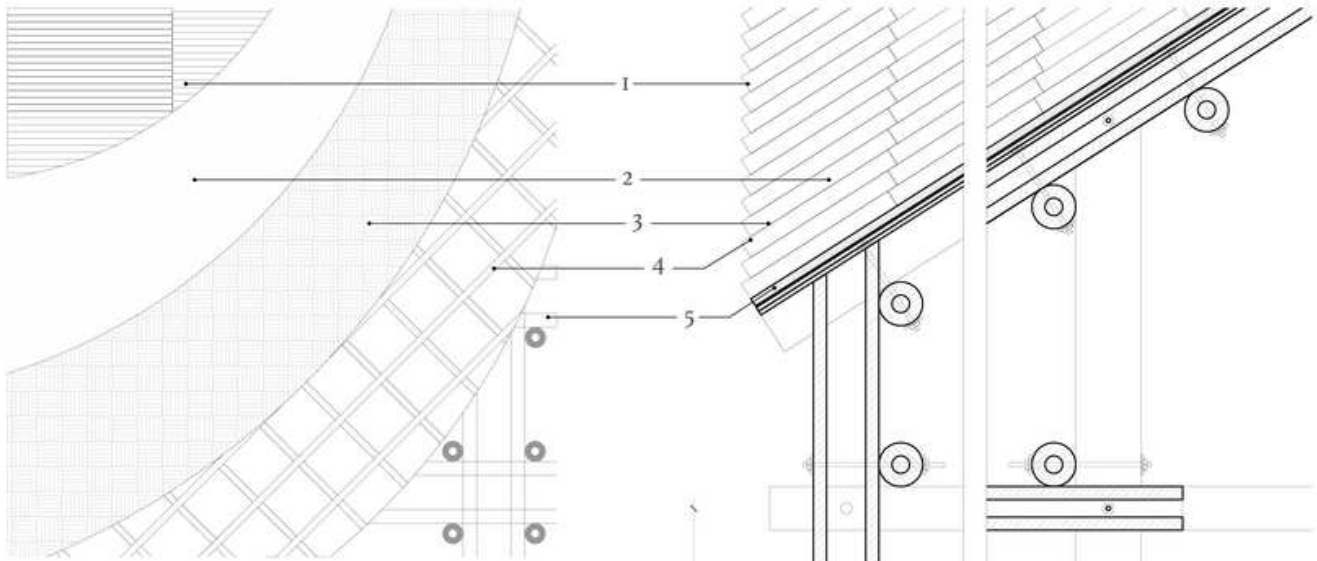
Figure 48 : Photo de la structure en bambou. © Avneesh Tiwari

Source : <https://www.archdaily.com/1012722/northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture/65b7d59911de481b4116be75-northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture-photo>



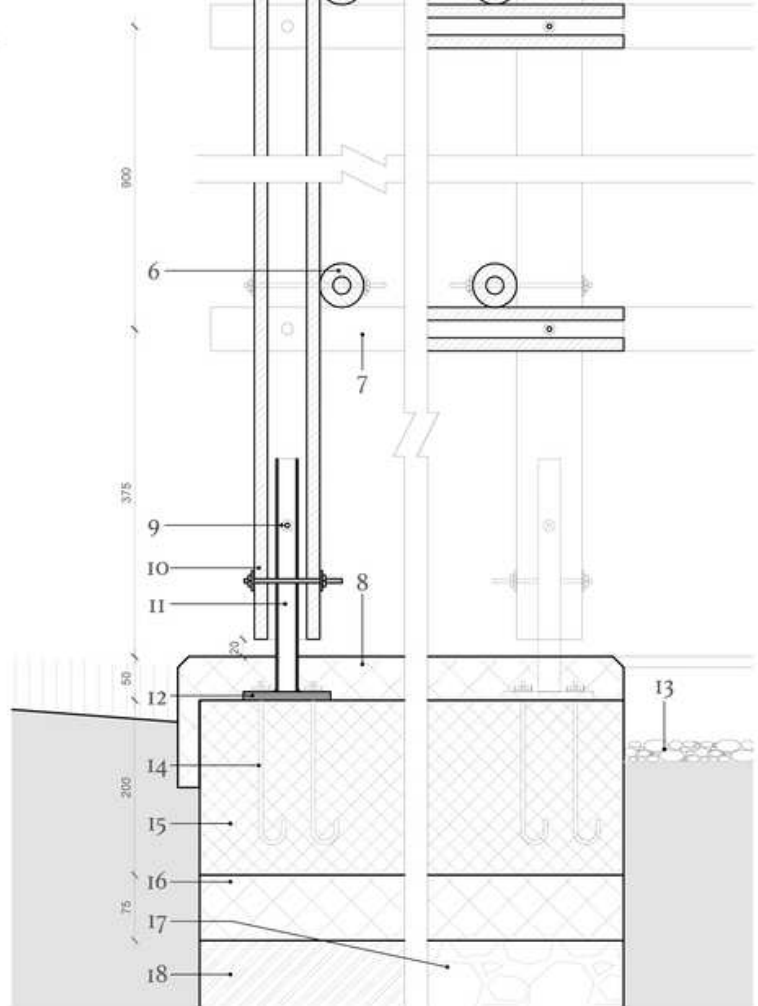
Figure 49 : Photo d'une jonction mécanique de bambous du projet NorthEast Bamboo Pavilion de atArchitecture. ©studio cardenas conscious Design

Source : Exposition Materia Architectures à Césure, Paris 5



Bamboo Roof Detail plan

1. Bamboo shingles
2. Waterproofing membrane
3. Cane mat
4. Criss-cross bamboo support
5. 50mm bamboo purlins
6. 50mm bamboo tie (latitudinal)
7. 50mm bamboo tie (longitudinal)
8. 50mm terrazzo flooring
9. Bamboo bolted to steel pipe ankle
10. 75 mm Bamboo columns @ 300 mm c/c
11. 25 mm dia steel pipe ankle
12. 100 x 100 x 10 mm base plate
13. Pebble in courtyard
14. Anchor bolt
15. 200 mm RCC grade slab
16. 75 mm PCC
17. Rubble Sole
18. Peripheral stone footing



Bamboo Joinery Details

Figure 48 : Détail d'assemblage en bambou du Northeast Bamboo Pavillon.

Source : <https://www.archdaily.com/1012722/northeast-bamboo-pavillon-atarchitecture/65c0e9a65bbe9d1c0bed0832-northeast-bamboo-pavillon-atarchitecture-bamboo-joinery-detail>

Analyse critique et analytique du projet :

Le pavillon a été **entièrement assemblé** à l'aide de **jonctions métalliques en acier et en aluminium**. Ce type d'assemblage confère à la structure une **possibilité de démontage élevée** pour certain élément (cf. figure 46) rendant le projet globalement réversible. Toutefois, d'autres assemblages ont été mobilisés comme les assemblages par boulons ce qui demande un perçage dans le bambou et peut **occasionner de légers dommages** qui restent facilement réparables. La principale **limite à la réversibilité** réside dans la semelle en **béton**, dont la démolition est indispensable pour un retour à l'état naturel du sol. Ce point constitue un frein local à la réversibilité complète du lieu.

Malgré cela, la réutilisation des matériaux est largement possible dans ce projet. Le **bambou**, non altéré par l'assemblage à sec, peut être **intégralement récupéré et réemployé** dans d'autres structures. Les connecteurs métalliques sont eux aussi récupérables. Seul le **béton**, qui ne peut être réutilisé tel quel, présente une limite en termes de réemploi. Il peut néanmoins être valorisé sous forme de gravats ou de graviers, ce qui offre une seconde vie partielle au matériau.

D'un point de vue analytique, l'utilisation du **bambou est extrêmement cohérente** avec le contexte indien, à la fois **culturellement et écologiquement**. La mobilisation d'**artisans locaux** valorise le savoir-faire régional et renforce le **lien au site**. Si l'emploi de jonctions métalliques modernes peut apparaître en décalage avec les techniques traditionnelles, il témoigne ici d'une **hybridation constructive**. Ce choix technique accroît à la fois la durabilité, la démontabilité et la réversibilité de l'ensemble.

Anandaloy

Anna Heringer

- Localisation : Rudrapur, Bangladesh (Asie)
- Climat : Climat tropical
- Fonction : Equipement social et médico-social
- Surface totale : 253 m²
- Composition : 2 étages
- Matériau principal : Bambou, terre crue
- Année de construction : 2019

Contexte et Enjeux :

Le Anandaloy Center, conçu par l'architecte Anna Heringer, est implanté dans le village rural de Rudrapur au Bangladesh. Ce projet vise à promouvoir l'inclusion sociale et à valoriser les ressources locales (matériaux, savoir-faire, main-d'œuvre) (Architecture Anna Heringer, s. d.; Heringer & Gauzin-Müller, 2024).

Le bâtiment accueille un centre pour personnes atteintes d'un handicap et un atelier de textile équitable (Dipdii Textiles). Ce bâtiment a pour objectif qu'autant les femmes locales que les personnes atteintes d'un handicap puissent avoir un lieu de travail et d'apprentissage (Architecture Anna Heringer, s. d.; Heringer & Gauzin-Müller, 2024).

La construction repose sur une approche durable et locale, à la fois éthique, écologique et sociale, fidèle à la démarche de Heringer. Le bâtiment se distingue par son mouvement architectural organique, qui incarne une liberté formelle rarement associée aux matériaux naturels comme la terre crue (Architecture Anna Heringer, s. d.; Heringer & Gauzin-Müller, 2024).



Figure 51 : Vue extérieure du Anandaloy Center. © Kurt Hoerbst.
Source : <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>



Figure 52 : Projet Anandaloy vue de côté d'Anna Heringer. ©Kurt Hoerbst
Source : <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>

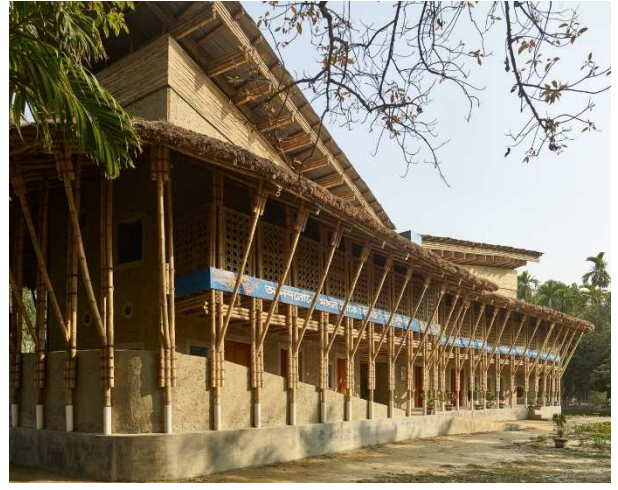


Figure 53 : Projet Anandaloy d'Anna Heringer. ©Kurt Hoerbst
Source : <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>

Approche Écologique :

Le projet utilise des matériaux locaux, notamment du bambou et de la terre, ainsi que la main-d'œuvre et les artisans de la région (ArchDaily, 2021-a). Contrairement aux constructions habituelles au Bangladesh, il se distingue par un plan aux formes courbes (ArchDaily, 2021-a). Le choix de la technique de la bauge pour les murs porteurs (Heringer & Gauzin-Müller, 2024) accompagne et renforce cette géométrie organique.

Fonctionnalité et Confort :

L'architecture d'Anandaloy a été conçue pour favoriser l'accessibilité et le bien-être de tous (Heringer & Gauzin-Müller, 2024). Le rez-de-chaussée abrite les espaces dédiés aux personnes handicapées, tandis que l'atelier textile est situé à l'étage supérieur (Heringer & Gauzin-Müller, 2024). Des rampes d'accès ont été intégrées dans la conception pour permettre aux personnes à mobilité réduite de se déplacer librement dans le bâtiment (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).



Figure 54 : Projet Anandaloy vu de l'intérieur d'Anna Heringer. ©Kurt Hoerbst
Source : <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>



Figure 55 : Projet Anandaloy vue du RDC d'Anna Heringer. ©Kurt Hoerbst
Source : <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>

Aspect structurel et constructif :

- | | |
|---|------------------------------------|
| - Structure : Porteuse verticale et horizontale | - Espèce du bambou : Non spécifiée |
| - Section du bambou : Non spécifiée | - Provenance du bambou : Locale |

Ce projet combine deux matériaux principaux : la terre crue et le bambou. Toutefois, l'analyse structurelle porte principalement sur la mise en œuvre du bambou. La terre est utilisée pour la réalisation d'un mur porteur en bauge.

D'après les photos et les autres projets d'Anna Heringer, le bâtiment repose sur une fondation en maçonnerie de briques de terre cuite (Architecture Anna Heringer, s. d.), qui sont supposées être recouvertes d'un enduit de parement. Dans cette même fondation, un tube en fer, est inséré et solidifié afin d'y insérer un bambou qui servira d'élément porteur vertical pour la dalle de plancher et pour la première toiture (cf. figure 56 zoom 1). Ces bambous sont fixés à l'aide d'assemblages traditionnels utilisant des cordes et des ligatures, combinés avec des assemblages crantés et percés. Aucune information n'est précisée concernant la section des bambous mais sur base de l'analyse de Köhl et Liese (2015), j'émetts l'hypothèse que l'espèce de bambou utilisée pourrait être soit *Bambusa balcooa*, soit *Dendrocalamus strictus*, soit *Guadua angustifolia*. Dans la région du Bangladesh, ces espèces sont parmi les plus couramment employées dans la construction, avec un diamètre de section généralement estimé entre 15 et 20 cm.

D'après l'analyse des photos, les dalles de plancher semblent composées d'un maillage de trois bambous superposés et disposés parallèlement à la longueur du bâtiment, croisés par un second ensemble de trois bambous perpendiculaires, puis encore croisés par une série de bambous positionnés à intervalles réguliers et rapprochés (cf. figure 56 zoom 2). L'ensemble est fixé à la structure de la première toiture par un système de cordage traditionnel. Concernant la finition, il semble qu'un tissage de bambou soit posé entre les bambous, puis recouvert ensuite d'une couche de terre coulée et lissée, ce qui donne une surface plane mais cela reste une hypothèse.

Le projet présente une double toiture. La première toiture est portée par des ensembles de deux bambous, recouverte de chaume de bambou (cf. figure 56 zoom 3). Elle permet de couvrir la coursive. La deuxième toiture repose sur un ensemble de quatre bambous superposés dans le sens de la longueur du bâtiment. Sur ceux-ci est fixé un second ensemble de quatre bambous, placés à intervalles réguliers. La couverture se compose d'un premier lit de bambous disposés longitudinalement, puis d'un second lit transversal, sur lequel vient se fixer la couverture finale qui est en tôle (cf. figure 56 zoom 4).

Le bambou est également utilisé en revêtement non porteur. À l'étage, sous forme de tissage laissant passer la lumière et l'air. Il est également utilisé sous les débords de toiture, sous forme de bardage plus classique.

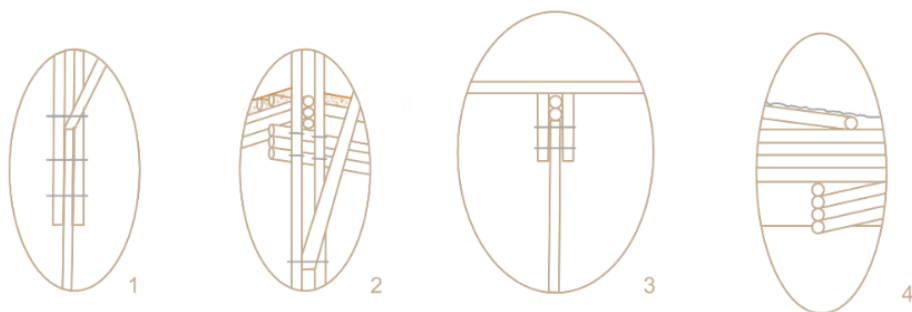


Figure 56 : Zoom explicatif sur les jonctions en bambou du projet Anandaloy d'Anna Heringer.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

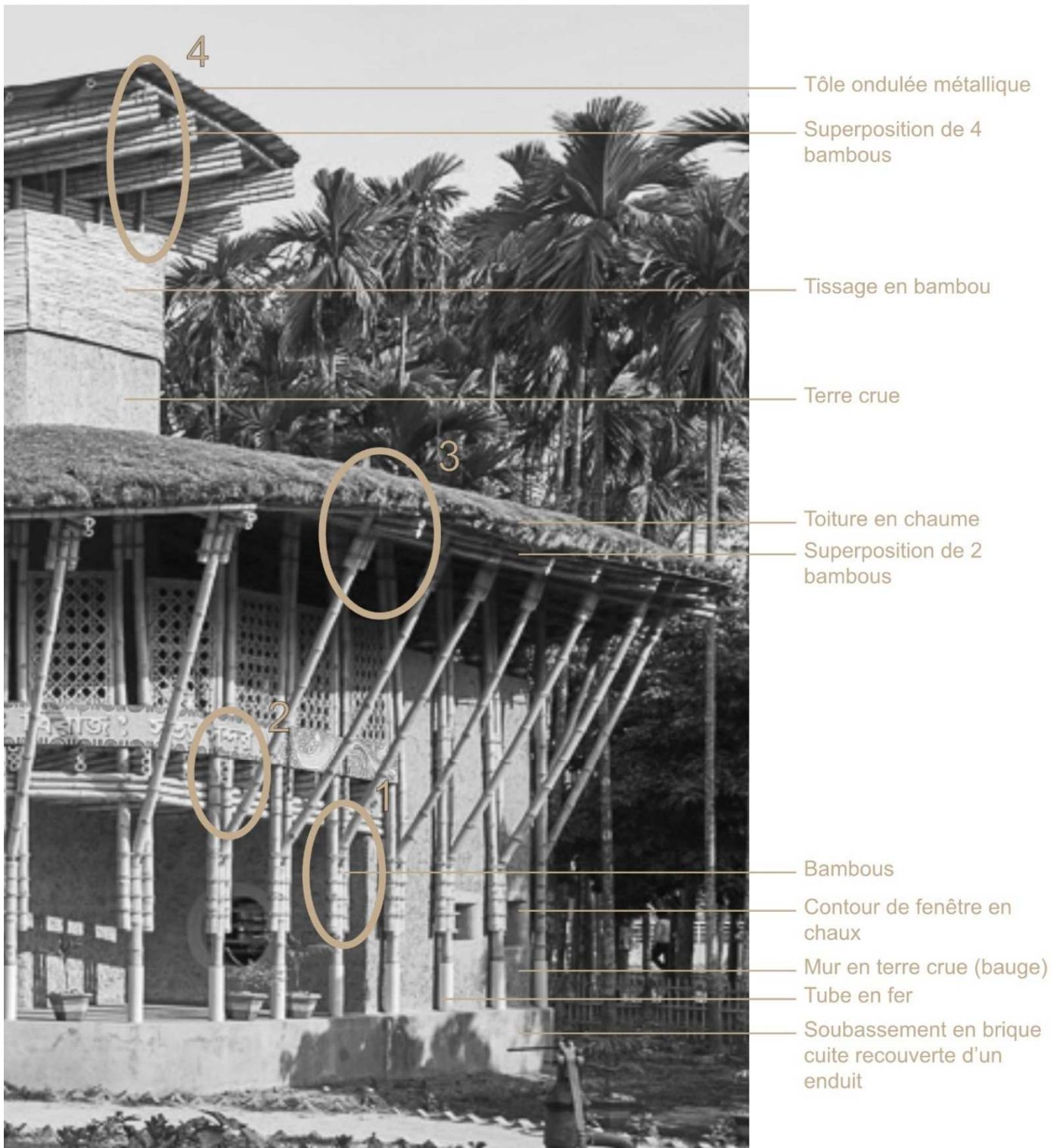


Figure 57 : Zoom sur un côté du projet Anandaloy d'Anna Heringer.
 Source : <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>

Analyse critique et analytique du projet

Le projet combine deux matériaux principaux : la **terre crue** (utilisée en bauge) et le **bambou**, assemblé à l'aide de **cordages**. Ce choix constructif favorise une **structure globalement réversible**. Les éléments en bambou, liés sans fixations permanentes, peuvent être démontés et réemployés aisément, à condition d'être retirés avec soin. Le bambou peut ainsi être réutilisé dans d'autres constructions. Dans cette même lignée, les **murs en terre crue**, bien qu'ils puissent être réemployés sous forme de matériau brut, nécessitent une **destruction préalable** pour être enlevés. Néanmoins, cette terre reste **réutilisable en l'état**, que ce soit comme **amendement de sol** ou pour la réalisation de nouveaux murs en terre. Les **fondations** représentent le point le moins réversible du projet, car elles sont **plus difficiles à démonter et à réutiliser**. En effet, les briques cuites recouvertes d'un enduit peuvent être récupérées, mais un **nettoyage** est nécessaire pour leur redonner un état proche du neuf. Ce qui est intéressant à souligner, c'est que, bien que les fondations soient moins facilement réutilisables que le reste de la structure, **aucun élément en béton n'a été utilisé**.

D'un point de vue analytique, ce projet est un **exemple fort de cohérence contextuelle**. En effet, tous les matériaux sont **locaux et biosourcés** (terre, bambou, main-d'œuvre). Les choix techniques (bauge, cordages) sont **ancrés dans les traditions locales**, renforçant **l'autonomie constructive**. Le plan courbe, rare au Bangladesh, traduit **une volonté d'innovation expressive**, tout en respectant les savoir-faire locaux et en montrant le potentiel des matériaux.

Desi Training Center

Anna Heringer

- Localisation : Rudrapur, Bangladesh (Asie)
- Climat : Climat tropical
- Fonction : Equipement scolaire
- Surface totale : 300 m²
- Composition : 1 étage
- Matériau principal : Bambou, terre crue
- Année de construction : 2017

Contexte et Enjeux :

Ce bâtiment met en valeur tant l'utilisation de matériaux locaux avec l'utilisation de la terre crue et du bambou que la participation locale des artisans de la région (*Earth Architecture*, 2024; ArchDaily, 2020-c). Le principal enjeu de ce projet résidait dans l'installation de sanitaires, ainsi que dans la pose de panneaux solaires sur le toit (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).

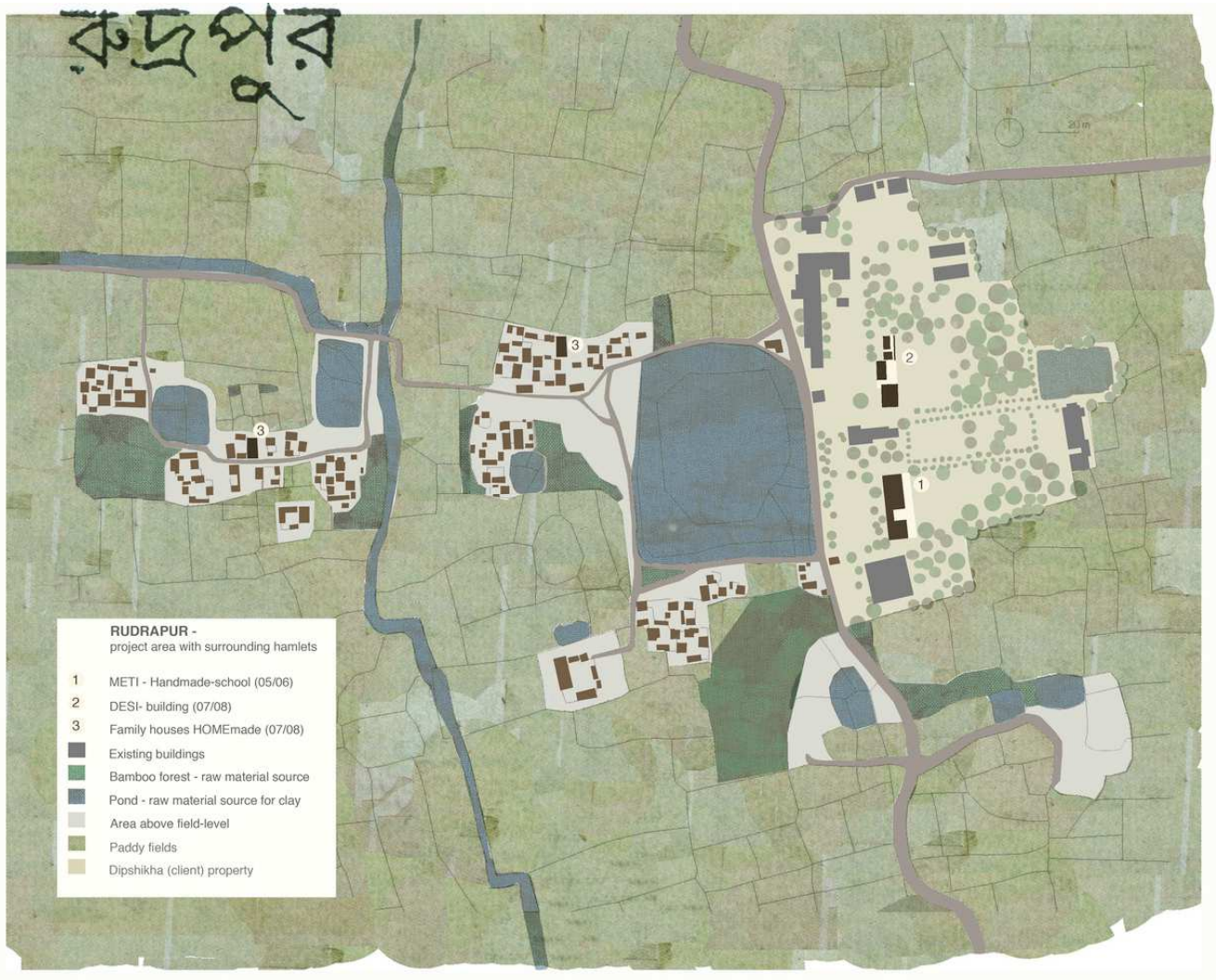


Figure 58 : Plan directeur de Rudrapur avec le projet Desi Training Center.
Source : <https://www.archdaily.com/950704/desi-training-center-studio-anna-heringer>



Figure 59 : Vue intérieure de l'étage du projet Desi Training Center d'Anna Heringer. © Naquib Hossain
Source : <https://www.archdaily.com/950704/desi-training-center-studio-anna-heringer>



Figure 60 : Projet Desi Training Center vue de l'intérieur d'Anna Heringer. © B.K.S. Inan
Source : <https://www.archdaily.com/950704/desi-training-center-studio-anna-heringer>

Approche Écologique :

Le bâtiment incarne une approche respectueuse de l'environnement et s'inscrit dans une démarche durable. Il optimise l'utilisation de la masse thermique, favorise la lumière naturelle et la ventilation passive, tout en intégrant des panneaux solaires pour renforcer son efficacité énergétique (Heringer & Gauzin-Müller, 2024). L'eau vient du puit et elle est chauffée avec des capteurs thermiques.

Fonctionnalité et Confort :

Le bâtiment se distingue par une conception optimisée, où les ateliers et espaces dédiés à l'apprentissage sont aménagés pour garantir une circulation aisée et intuitive. Par ailleurs, l'emploi de la terre crue contribue au confort des occupants, grâce à ses propriétés d'inertie thermique qui favorisent une régulation naturelle de la température intérieure (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).



Figure 61 : Projet Desi Training Center d'Anna Heringer. ©Kurt Hoerbst
Source : <https://arquitecturaviva.com/works/building-desi-rudrapur>

Aspect structurel et constructif :

- | | |
|---|------------------------------------|
| - Structure : Porteuse verticale et horizontale | - Espèce du bambou : Non spécifiée |
| - Section du bambou : Non spécifiée | - Provenance du bambou : Locale |

Ce projet combine deux matériaux, la terre crue et le bambou, mais l'analyse structurelle se concentre principalement sur la mise en œuvre du bambou. Les murs porteurs sont en terre crue avec la technique de la bauge. La terre crue est directement retirée juste à côté du projet (*Earth Architecture, 2024*).

À partir des photos disponibles et par analogie avec d'autres projets d'Anna Heringer, il semble que le bâtiment repose sur des fondations en briques de terre cuite, probablement enduites d'un parement. Dans cette fondation, un fourreau en fer (Divisare, s. d.-a), a été inséré et scellé afin d'accueillir un bambou servant de support vertical où est ajouté deux autres bambous qui soutiennent autant la dalle de plancher que la toiture du projet (cf. figure 62 zoom 1). Les bambous sont assemblés selon des techniques traditionnelles de cordages et de ligatures, complétées par des assemblages crantés et percés (Divisare, s. d.-a). Aucune information précise n'est disponible sur la section des bambous mais en m'appuyant sur l'analyse de Köhl et Liese (2015), il est plausible que l'espèce de bambou utilisée appartienne à l'une des suivantes : *Bambusa balcooa*, *Dendrocalamus strictus* ou *Guadua angustifolia*. Ces variétés figurent parmi les plus fréquemment utilisées dans le secteur de la construction au Bangladesh, présentant généralement un diamètre compris entre 15 et 20 cm.

D'après l'analyse des photos, **les dalles de plancher** semblent semblables au projet précédent et donc, composées d'un maillage de trois bambous superposés et disposés parallèlement à la longueur du bâtiment, croisés par un second ensemble de deux bambous perpendiculaires. L'ensemble est fixé avec le même assemblage décrit précédemment. Concernant la finition, il semble qu'un tissage de bambou soit posé sur cette dalle, recouvert ensuite d'une couche de terre coulée et lissée, ce qui donne une surface plane (cf. figure 62 zoom 2) mais cela reste une hypothèse. Il y a également des tapis disposés sur le sol.

Deux éléments de toiture sont présents dans ce projet. Ces deux toitures débordent du mur afin de protéger les matériaux des intempéries et autres dégradations. La **première toiture**, plus basse, repose sur une structure composée d'un ensemble de trois bambous superposés, positionnés perpendiculairement à la façade principale. D'autres bambous, disposés parallèlement à cette façade à intervalles réguliers, viennent compléter l'ossature. Une tôle transparente est ensuite posée sur cette structure pour constituer la couverture (cf. figure 62 zoom 3). La **seconde toiture** est plus complexe car elle est inclinée. Elle est soutenue par un ensemble de quatre bambous superposés, renforcés par un bambou placé en sens inverse. La couverture est réalisée en tôle ondulée, conçue pour accueillir des panneaux solaires (cf. figure 61).

Le bambou est également utilisé comme revêtement non porteur. À l'étage, il est tissé pour laisser passer l'air et la lumière, il est mis en œuvre sous forme de bardage classique sous les débords de toiture. À l'intérieur, le bambou est également utilisé comme bardage mural (cf. figure 60) et sous forme de tissage opaque pour la finition du plafond.

ZOOM explicatif

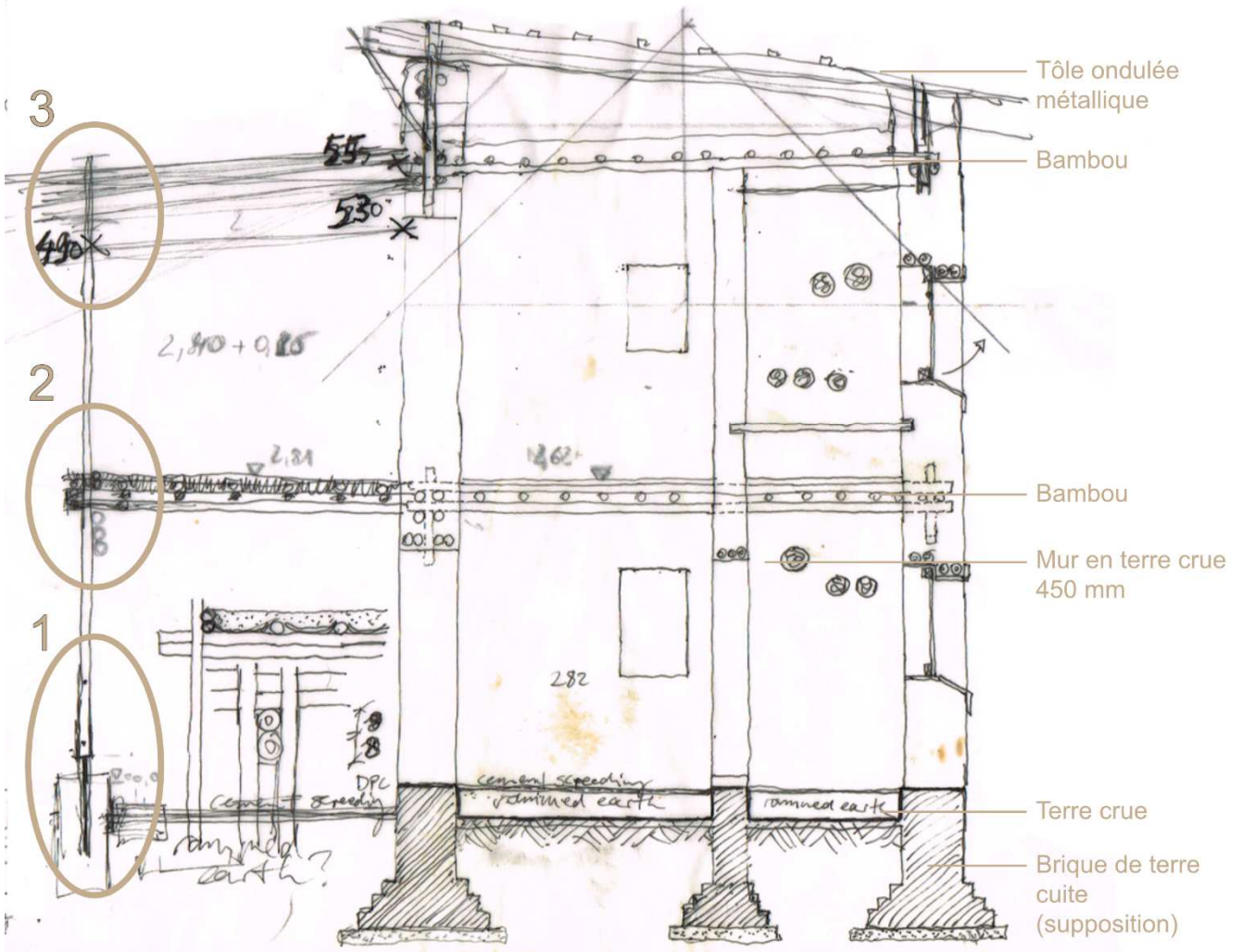
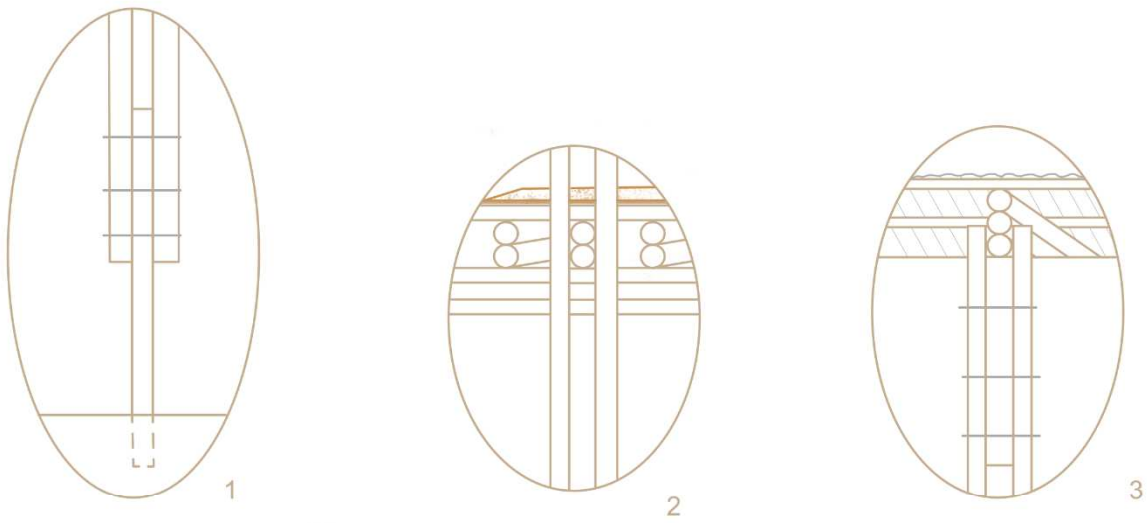


Figure 62 : Plan et coupe détaillée du projet Desi Training Center d'Anna Heringer.
 Source : <https://www.archdaily.com/950704/desi-training-center-studio-anna-heringer>

Réversibilité du projet :

Le projet est composé de **murs en terre crue** ainsi que d'une **structure en bambou**. La **réversibilité** du projet est possible. En effet, les murs en terre crue doivent être **détruits** pour que ce matériau demeure **entièrement réutilisable**. Une fois récupérée, la **terre** peut être **réemployée telle quelle**, que ce soit comme **amendement pour le sol** ou pour la construction de **nouveaux murs en terre**. Le **bambou** peut également être **facilement démonté**, car le projet utilise des **assemblages simples** ou **cordés**.

En ce qui concerne les **fondations**, les informations disponibles sont **limitées**. Toutefois, à partir de l'analyse d'autres projets réalisés par **Anna Heringer**, on peut supposer qu'elles sont généralement constituées de **briques cuites** recouvertes d'un **enduit**. Du point de vue de la **réversibilité**, cela implique un **nettoyage préalable** des briques, ce qui rend leur **réemploi plus complexe**.

D'un point de vue analytique, ce projet incarne **une parfaite adaptation locale**, avec **approvisionnement en matériaux naturels et locaux**, **mise en œuvre artisanale**, **maîtrise de la thermique (inertie, ventilation naturelle)** et **autonomie énergétique (solaire)**. Il montre un **dialogue fort entre architecture et territoire** : tout est pensé pour **réduire l'empreinte environnementale et technologique**. Les panneaux solaires sur une toiture en matériaux légers renforcent l'autonomie sans nuire à la cohérence du projet.

Contemplation Bamboo Pavillon

Simon Vélez

- Localisation : Arles, France (Europe)
- Climat : Climat méditerranéen
- Fonction : Lieu d'exposition
- Surface totale : 400 m²
- Composition : De plain-pied
- Matériau principal : Bambou
- Année de construction : 2018

Contexte et Enjeux :

Le projet Contemplation Bamboo Pavillon est réalisé par l'architecte Simon Vélez en 2018. Il a pour superficie 400 m². C'est un projet qui a été construit pour accueillir une exposition de photos de Matthieu Ricard ayant pour thème, l'eau (Gauzin-Müller et al., 2019). Il prend vie à Arles en France (Kleiber, 2022).

Ce projet s'inscrit dans une logique de construction éphémère, avec un enjeu principal : sa réversibilité. Il devait être démonté après l'exposition (Quinton, 2018), ce qui a fortement influencé les choix constructifs, notamment l'usage de systèmes d'assemblage à sec, facilitant le démontage sans détériorer les matériaux. Le pavillon met en valeur le potentiel du bambou comme matériau léger, durable et modulable.



Figure 63 : Contemplation Bamboo Pavillon à Arles de Simon Vélez. © JAN DYVER
Source : <https://ideat.fr/simon-velez-larchitecte-qui-veut-renouer-avec-le-vegetal/>



Figure 64 : Contemplation Bamboo Pavillon. © Xavier de Jauréguiberry
 Source : <https://divisare.com/projects/390925-simon-velez-architects-xavier-de-jaureguiberry-contemplation-bamboo-pavilion>



Figure 65 : Contemplation Bamboo Pavillon, photo des parois. © Xavier de Jauréguiberry
 Source : <https://divisare.com/projects/390925-simon-velez-architects-xavier-de-jaureguiberry-contemplation-bamboo-pavilion>

Approche Écologique :

L'un des aspects les plus remarquables de ce projet est son mode d'assemblage. Entièrement conçu avec des fixations mécaniques, il ne nécessite ni mortier ni béton, ce qui limite son impact environnemental. Cette approche favorise la réutilisation des matériaux et renforce le caractère démontable (Quinton, 2018). Il est important de souligner que le bambou utilisé a été importé, ce qui interroge la cohérence écologique globale du projet.

Fonctionnalité et Confort :

Avec une longueur de 70 mètres et une hauteur de 10 mètres, cette structure se distingue par l'omniprésence du bambou, qui constitue l'élément principal de l'ossature et de l'enveloppe du bâtiment y compris sa couverture. L'usage de l'espèce de bambou *Guadua angustifolia*, reconnue pour sa robustesse et sa flexibilité, est privilégié dans ce projet (Gauzin-Müller et al., 2019).



Figure 66 : Contemplation Bamboo Pavillon à Arles vue de l'intérieur de Simon Vélez. © JAN DYVER
 Source : <https://ideat.fr/simon-velez-larchitecte-qui-veut-renouer-avec-le-vegetal/>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Ferme et demi-ferme
- Espèce du bambou : *Guadua angustifolia*
- Section du bambou : 120 mm
- Provenance du bambou : Colombie (supposition)

Composé principalement de bambou *Guadua angustifolia* (Gauzin-Müller et al., 2019), ce pavillon met en avant des assemblages innovants qui marient des techniques traditionnelles et avec des techniques modernes. La structure utilise environ **1800 tiges** de bambou d'un **diamètre de 12 cm** et mesurant entre **3 et 10 mètres de long** (Gauzin-Müller et al., 2019).

Ce projet n'a pas de fondation car il a été pensé pour être démonté. Il a néanmoins un plancher qui est surélevé et repose sur des pieds en métal qui supportent un anneau périphérique en tube d'acier de 114,3 mm de diamètre. Ce tube forme la base structurante du pavillon et sert d'ancrage aux éléments verticaux. Les panneaux de bambou sont ensuite fixés au-dessus pour constituer le sol du pavillon (Gauzin-Müller et al., 2019).

D'après les photos et les plans, La structure repose sur une succession de fermes et demi-fermes, stabilisées par des armatures métalliques qui ceinturent le pavillon. Les tiges de bambou sont mécaniquement fixées à ce tube, et solidarisiées par des écrous et des tiges filetées.

La toiture est réalisée avec des lattes de bambou (environ 2 cm de large et 10 à 16 mm d'épaisseur), et elle est ensuite recouverte de roseau, apportant une protection supplémentaire (Gauzin-Müller et al., 2019).



Figure 67 : La structure du Contemplation Bamboo Pavillon de Simon Vélez. © Xavier de Jauréguiberry
Source : <https://divisare.com/projects/390925-simon-velez-architects-xavier-de-jauréguiberry-contemplation-bamboo-pavilion>



Figure 68 : Photo des jonctions métalliques entre les bambous. © Xavier de Jauréguiberry
 Source : <https://divisare.com/projects/390925-simon-velez-architects-xavier-de-jauréguiberry-contemplation-bamboo-pavilion>

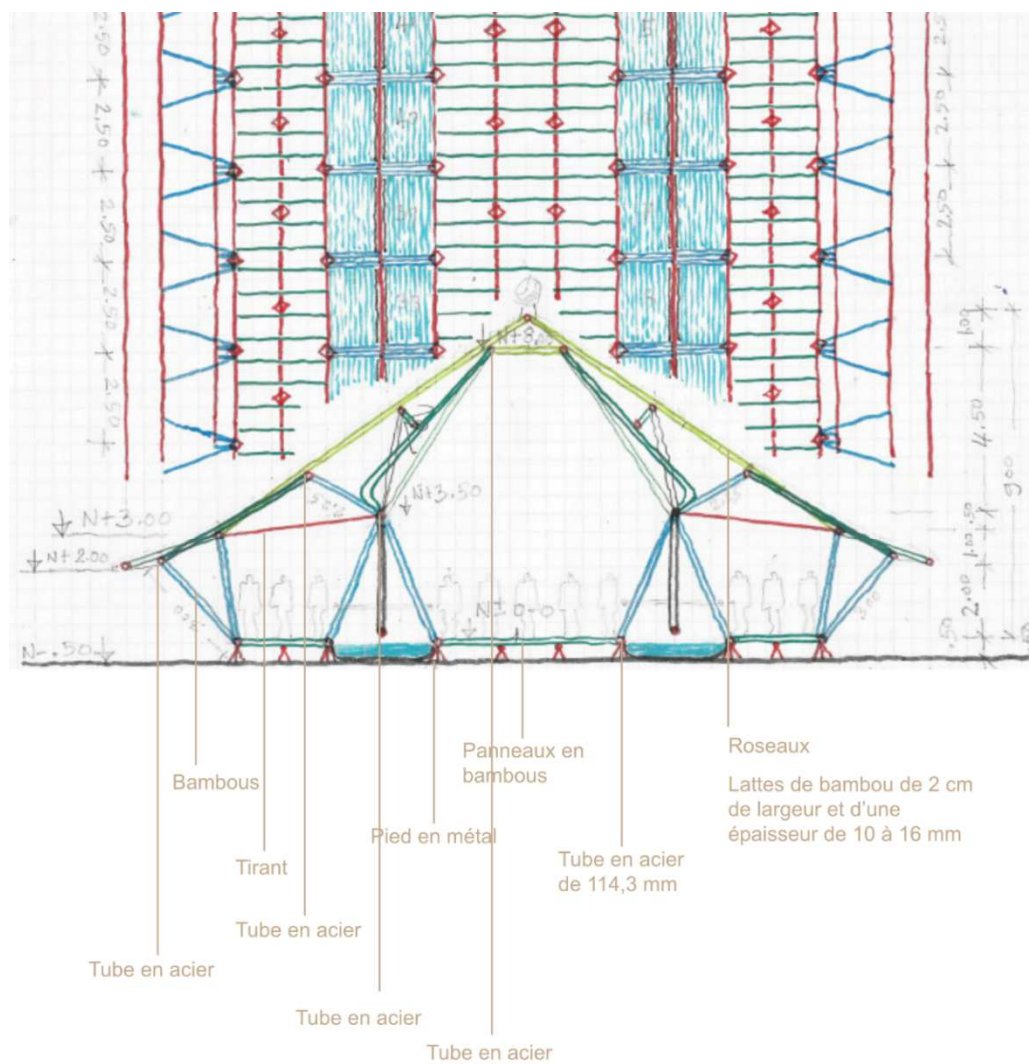


Figure 69 : Croquis de Simon Velez pour le pavillon arlésien.
 Source : <https://ideat.fr/simon-velez-larchitecte-qui-veut-renouer-avec-le-vegetal/>

Analyse critique et analytique du projet

Le **Pavillon de Bambou** de **Simón Vélez**, construit à **Arles**, se distingue par sa conception **entièrement démontable**, offrant une **réversibilité totale** du projet. Son **système d'assemblage sans mortier ni béton** facilite non seulement le **démontage**, mais aussi la **réutilisation des matériaux**. Le **bambou**, matériau **durable** par nature, peut ainsi être **récupéré** et intégré à d'autres constructions, limitant considérablement les **déchets** en fin d'usage. Cette approche, qui permet de **reconfigurer les éléments** dans de nouveaux projets architecturaux, s'inscrit pleinement dans une logique de **gestion raisonnée des ressources** et des **matériaux de construction**.

D'un point de vue analytique, le caractère **démontable** du projet illustre pleinement le **potentiel constructif du bambou**. Dans ce cas, des **assemblages métalliques** ainsi que des **éléments de sous-structure en métal** ont été utilisés afin de rendre la structure **extrêmement polyvalente**. Il est cependant important de souligner (bien que l'information ne soit pas explicitement communiquée) que le **bambou utilisé aurait été importé**, vraisemblablement depuis la **Colombie**. Cette **importation sur longue distance** implique un **impact lié au transport** qui peut entrer en contradiction avec les principes généralement associés aux **constructions en bambou biosourcé**, à savoir la **proximité des ressources** et la **réduction de l'empreinte carbone**. C'est donc ce **rapport entre transport et durabilité** qui mérite d'être questionné dans ce type de projet bien qu'il soit intéressant sous d'autres points mentionnés plus tôt.

Bamboo Sports Hall for Panyaden International School

Chiangmai Life Construction (Markus Roselieb, Tosapon Sittiwong)

- Localisation : Chiang Mai, Thaïlande (Asie)
- Climat : Climat tropical
- Fonction : Equipement sportif
- Surface totale : 782 m²
- Composition : De plain-pied
- Matériau principal : Bambou
- Année de construction : 2017

Contexte et Enjeux

Ce projet est une salle de sport située en Thaïlande, plus précisément à Chiang Mai. Il a été conçu pour répondre aux besoins éducatifs et sportifs de l'établissement scolaire, tout en s'inspirant des principes bouddhistes et de la quête d'un lien harmonieux avec la nature (ArchDaily, 2021-b).

L'un des principaux défis consistait à concevoir une structure durable et résistante essentiellement en bambou, capable de supporter les contraintes climatiques locales. Le bâtiment peut accueillir jusqu'à 300 élèves dans un espace alliant fonctionnalité sportive et engagement écologique (ArchDaily, 2021-b). Son architecture s'inspire de la fleur de lotus, symbole spirituel emblématique du bouddhisme (ArchDaily, 2021-b).



The Assembly Hall is located right in the centre of the school, easily accessible from the kindergarten and primary school as well as for the parents from the car park



Figure 70 : Plan d'implantation du projet Bamboo Sports Hall for Panyaden International School.
Source : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>



Figure 71 : Vue aérienne du projet Bamboo Sports Hall for Panyaden International School. © Markus Roselieb
 Source : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>



Figure 72 : Photo du projet Bamboo Sports Hall for Panyaden International School. © Markus Roselieb
 Source : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>

Approche Écologique

Construit essentiellement en bambou, ce bâtiment s'inscrit dans une approche durable de l'architecture (ArchDaily, 2021-b). L'objectif était de prouver qu'une structure en bambou pouvait être aussi résistante que les structures plus conventionnelles (béton ou acier), tout en ayant un impact écologique réduit.

Fonctionnalité et Confort

Le bâtiment est conçu pour offrir un espace adapté à différentes pratiques sportives, notamment le football, le basketball, le volleyball et le badminton (ArchDaily, 2021-b). Grâce à son architecture ouverte et à la disposition des matériaux, la ventilation naturelle y est optimale, garantissant un confort thermique sans recours à la climatisation (ArchDaily, 2021-b).

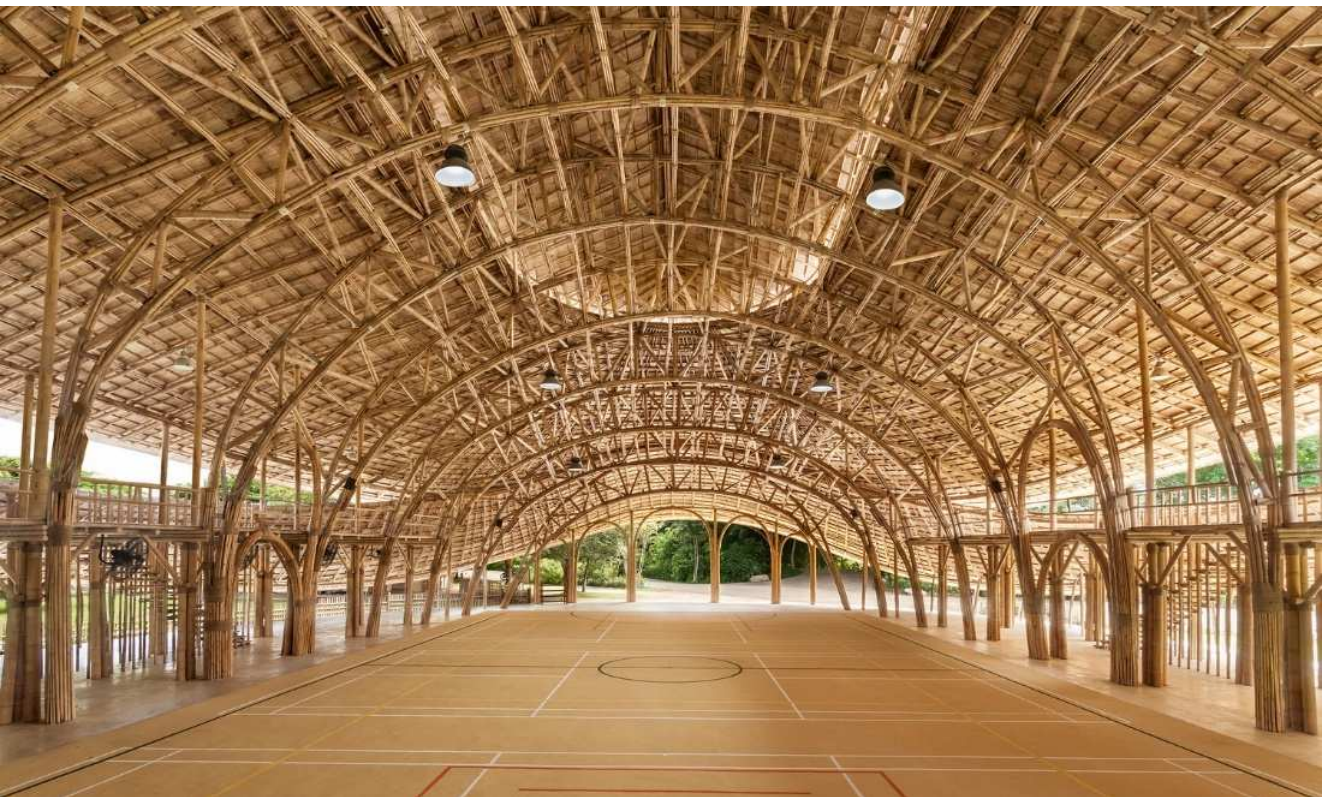


Figure 73 : Photo de l'intérieur du projet Bamboo Sports Hall for Panyaden International School. © Alberto Cosi
 Source : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>

Aspect Structurel et constructif :

- Structure : Ferme préfabriqué
- Espèce du bambou : Non spécifiée
- Section du bambou : Non spécifiée
- Provenance du bambou : Locale

Aucune information précise n'est disponible concernant les fondations du bâtiment. On peut néanmoins supposer qu'au-dessus de celles-ci, le sol intérieur a été nivelé puis revêtu d'un matériau adapté aux activités sportives. Bien que la nature exacte de ce revêtement ne soit pas précisée, il est raisonnable de penser qu'il a été choisi pour garantir à la fois le confort des usagers et une bonne résistance à l'usure.

La structure principale s'organise autour de grandes fermes en bambou, préfabriquées directement sur le place (cf. figure 81). Ces fermes sont un ensemble de plusieurs bambous assemblés entre eux pour ensuite être solidifiés par des montants au milieu (cf. figure 81). Ces fermes atteignent une portée de 17 mètres, exploitant les capacités mécaniques du bambou. Fait remarquable : ces éléments ne contiennent aucun renfort métallique, tous les assemblages sont faits avec des ligatures (ArchDaily, 2021-b). Le bambou utilisé a été traité au sel de borax, un traitement écologique permettant de le rendre résistant aux insectes et à la dégradation biologique (ArchDaily, 2021-b).

La charpente de toiture est composée d'un premier lit de bambous disposés longitudinalement, puis d'un second lit transversal. Sur cela est posée la couverture de toiture constituée de bardeaux de bambou.



Figure 74 : Photo d'un ferme préfabriqué. © Markus Roselieb

Source : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>



Figure 75 : Photo d'une jonction de bambous réalisée par ligature. © Alberto Cosi
 Source : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>

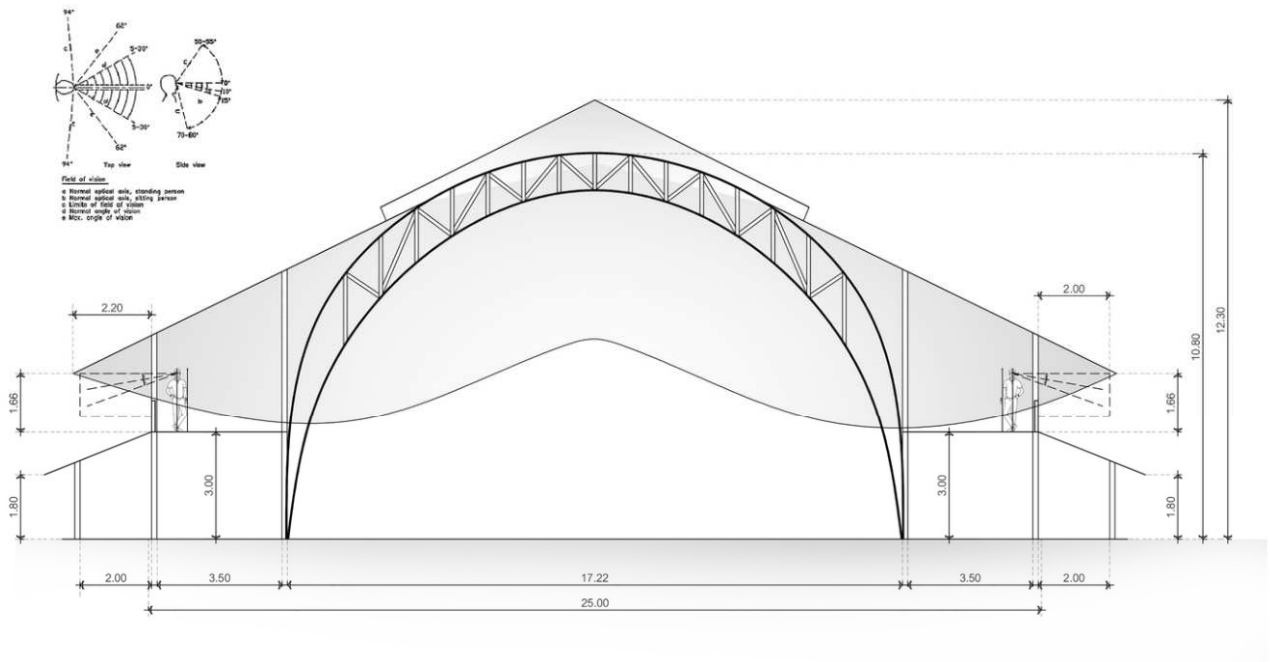


Figure 76 : Section dans le gymnase de la Panyaden School.
 Source : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>

Analyse critique et analytique du projet

Le **Bamboo Sports Hall**, situé à **Chiang Mai**, a été conçu selon une approche qui privilégie la **réversibilité** et la **durabilité**. Ce choix s'exprime d'abord par l'utilisation du **bambou**, un matériau **polyvalent**, **réutilisable** et bien adapté au **climat tropical** de la région. Les **fermes en bambou, préfabriquées sur place**, sont assemblées grâce à un **système de cordage**, sans renforts métalliques. Cette méthode favorise à la fois la **démontabilité** de la structure et sa **flexibilité**, tout en limitant son **empreinte écologique**. Une fois démontées, ces fermes peuvent être **réutilisées** dans d'autres projets sans perdre leur **efficacité structurelle**.

D'un point de vue analytique, le projet illustre comment une **conception optimisée** et un **assemblage réfléchi** peuvent valoriser les **propriétés naturelles du bambou**. Le résultat : une structure à la fois **résistante**, **évolutive**, et **respectueuse de l'environnement**, qui démontre que le bambou peut rivaliser avec des matériaux plus conventionnels tout en réduisant considérablement l'impact environnemental de la construction.

Tableau synthèse des projets en bambou

Le tableau ci-dessous établit une comparaison, sur base de différents indicateurs, des projets sélectionnés. Il met en évidence les différentes méthodes de construction et les usages du bambou en fonction des contextes et besoins spécifiques de chaque projet.

	AtArchitecture- NorthEast bamboo pavilion for Surajkund Craft Fair	Anna Heringer – Anandaloy	Anna Heringer - Desi Training center	Simon Vélez – Pavillon de bambou	Bamboo Sports Hall for Panyaden International School
Localité	Faridabad, Inde	Rudrapur, Bangladesh	Rudrapur, Bangladesh	Arles, France	Chiang Mai, Thaïlande
Climat	Climat tropical	Climat tropical	Climat tropical	Climat Tempéré	Climat tropical
Date de construction	2023	2019	2008	2018	2017
Superficie	420 m ²	253 m ²	300 m ²	1000 m ²	782 m ²
Composition	De plain-pied	2 étages	1 étage	De plain-pied	De plain-pied
Fonction	Bâtiment d'exposition	Equipement social et médico-social.	Equipement scolaire	Bâtiment d'exposition	Equipment sportif
Participation locale	Main d'oeuvre locale	Main d'oeuvre locale	Main d'oeuvre locale	non	Non spécifiée
Matériau utilisé	Bambou	Bambou, terre crue	Bambou, terre crue	Bambou, acier	Bambou
Essence utilisée	Non spécifiée	Non spécifiée	Non spécifiée	Bambou guanda importé	Non spécifiée
Provenance du matériau	Essence locale	Essence locale	Essence locale	Importé de Colombie	Non spécifiée
Section du bambou	50 mm et 75 mm	Non spécifiée	Non spécifiée	120 mm	Non spécifiée
Type d'assemblage	Plaques de jonction en acier inoxydable et boulons	Techniques de nœuds et de ligatures	Techniques de nœuds et de ligatures	Connecteurs métalliques	Techniques de nœuds et de ligatures
Réversibilité du projet	Facile	Facile à moyenne	Facile à moyenne	Facile	Facile
Réutilisation envisage des matériaux	Réutilisation complète	Réutilisation complète	Réutilisation complète	Réutilisation complète	Réutilisation complète
Impact écologique	Nul à faible	Nul à faible	Nul à faible	Moyen à élevé (dépend du transport pour avoir acheminé le bambou)	Nul à faible

Figure 77 : Tableau récapitulatif des projets en bambou.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

À travers l'analyse de ces cinq projets (bien qu'il en existe bien d'autres), il apparaît clairement que le bambou est utilisé principalement comme **matériau structurel**, et ce, dans des éléments de **charpente**. En effet, le bambou intervient à la fois dans des éléments verticaux et horizontaux, et il est particulièrement employé pour la réalisation de **planchers** et **toitures**. Toutefois, dans certains cas, comme dans les projets d'**Anna Heringer**, un **remplissage** est nécessaire pour compléter la structure.

Les projets étudiés sont tous implantés dans des **régions où le bambou pousse naturellement**, ce qui facilite son utilisation et souligne l'importance de tirer parti des **ressources locales**. Ces constructions varient en taille et dépassent parfois celle d'un simple logement, prouvant que le bambou peut être adapté à des **besoins architecturaux plus vastes**. À l'exception du projet en **France**, tous se trouvent dans des **climats tropicaux**, adaptés aux caractéristiques du bambou.

Une constante dans ces projets est la **limitation à deux étages**. Lorsqu'un projet présente deux étages, il a recours à la **terre crue**, cela permet de renforcer la structure tout en maintenant les propriétés écologiques du bambou. En termes de **fonction**, l'utilisation du bambou est parfaitement cohérente avec les besoins architecturaux des projets : il permet de créer des **charpentes ouvertes**, idéales pour une bonne ventilation et aération, indispensables dans les **climats tropicaux**. En se basant sur les informations fournies, on peut estimer que la section du bambou est comprise entre 50 mm et 120 mm.

Le projet à **Arles** est particulièrement intéressant car, en plus de servir d'espace d'exposition, il illustre le **potentiel du bambou** pour des structures démontables. Cependant, il convient de souligner l'impact environnemental lié à l'**importation du bambou**, ce qui alourdit l'empreinte écologique du projet.

En plus de son rôle structurel, le bambou peut aussi servir de **parement**, de **couverture de toiture**, ou de **revêtement de sol**, notamment sous forme de **tissage**. Les **assemblages par ligatures** (utilisant des cordes) sont les plus couramment employés, bien que certains projets recourent à des assemblages **mécaniques**. Ces assemblages sont souvent **réversibles** et faciles à démonter, ce qui favorise la **réutilisation des matériaux** et soutiennent l'idée de constructions **durables et écologiques**, à faible impact.

Un défi majeur dans l'utilisation du bambou réside dans sa **vulnérabilité à l'humidité**. Lorsqu'il entre en contact direct avec un sol humide, il peut se dégrader rapidement. Pour éviter cela, des techniques spécifiques d'assemblages, comme l'utilisation de **fourreaux métalliques**, sont mises en place pour protéger le bambou de l'humidité.

Ainsi, ces projets montrent la grande **adaptabilité** du bambou à des **contextes variés**, tout en mettant en évidence les enjeux **structurels** et **écologiques** qui en découlent. L'utilisation locale du bambou, sans transport lointain, permet de réduire l'empreinte écologique et de répondre de manière efficace aux **besoins climatiques** et **culturels** locaux, en faisant du bambou un matériau à la fois durable et polyvalent. Ces études de cas ont enrichi ma réflexion sur la diversité des usages du bambou et ses multiples avantages pour l'architecture moderne.

Projets vernaculaires bambou

Le bambou, comme mentionné précédemment, est un matériau utilisé dans la construction depuis des millénaires (Nurdiah, 2016). Ce chapitre se concentrera sur deux exemples où les habitants ont exploité ce matériau pour bâtir leur habitat : les *Bahay Kubo* aux Philippines et les maisons traditionnelles flottantes en Birmanie.

Bahay Kubo (hutte nipa)

Le Bahay Kubo est la maison traditionnelle aux Philippines utilisant des matériaux locaux tel que du bambou, du bois de cocotier ou de la pierre (Douce Cahute, s. d.-a). Ces maisons sont caractérisées par leur structure sur pilotis en pierre ou en élément dur qui la surélève du sol afin de les tenir à distance de l'eau et de l'humidité (Douce Cahute, s. d.-a) ainsi que leurs plans carrés ou rectangulaires où la forme ne suit pas forcément la fonction (Villalon, 2002). Les murs de ces maisons sont constitués de feuilles de palmier tissées, un matériau léger qui permet à l'air de circuler librement (Douce Cahute, s. d.-a). Le toit, quant à lui, est en pente et en surplomb (Villalon, 2002). Il est recouvert de feuilles de palmier, appelées *nipa*. Celles-ci sont brûlées afin d'assurer leur imperméabilisation (Douce Cahute, s. d.-a).



Figure 78 : Bahay Kubo.

Source : <https://maison-monde.com/hutte-nipa-maison-traditionnelle-philippines/>

Maisons traditionnelles flottantes en Birmanie

Les maisons flottantes traditionnelles de Birmanie, notamment sur le lac Inle dans le village de Nampan (Futura, s. d.), sont construites sur pilotis au-dessus de l'eau (Douce Cahute, s. d.-b) et l'espace situé sous la maison est utilisé comme zone de stockage pour les pirogues (Robinne, 1992). C'est un habitat groupé (Robinne, 1999). Les pilotis de bambous sont plantés dans le fond du lac (*Les maisons sur pilotis du lac Inle*, 2017). Elles sont réalisées à partir de matériaux locaux tels que le bambou, le bois et les feuilles de palmier (Douce Cahute, s. d.-b). L'intérieur de ces habitations présente un plan libre avec peu de cloisons, favorisant une circulation fluide de l'air et de la lumière (Douce Cahute, s. d.-b). La toiture, quant à elle, est à double pente et recouverte de chaume ou de feuilles de palmier ou encore en tôle ondulée (Robinne, 1999), offrant ainsi une protection efficace contre les intempéries. Elle est composée d'un ou plusieurs niveaux (Robinne, 1999).



Figure 79 : Maisons flottantes traditionnelles en Birmanie.

Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/photos/voyage-partir-birmanie-voyage-fascinant-antoine-1512/voyage-maisons-flottantes-traditionnelles-birmanie-11055/>

Tableau synthèse des projets vernaculaires en bambou

Critères	Bahay Kubo (Philippines)	Maisons flottantes du lac Inle (Birmanie)
Climat	Tropical humide	Climat Tropical
Contexte	Rural, maison de famille	Maisons regroupées en village sur l'eau
Structure	Pilotis, poteau/poutre	Pilotis en bambou plantés dans le sol du lac, poteau/poutre
Matériaux principaux	Bambou, bois de cocotier, feuilles de palmier (nipa)	Bambou, bois, chaume
Système constructif	Légers, emboîtement et ligatures, toiture à forte pente (A partir des photos)	Ligatures et emboîtements (A partir des photos), toiture double pente
Plan intérieur	Plan simple, souvent carré ou rectangulaire	Plan libre, très peu cloisonné
Ventilation & éclairage	Murs perméables à l'air, ventilation naturelle, lumière filtrée (tissage)	Ventilation traversante, bonne luminosité
Adaptation au milieu	Surélévation : protection contre humidité, crues,..	Adaptation à la montée du niveau de l'eau, rangement sous les pilotis
Caractère éphémère / démontable	Oui, démontables et réparables facilement	Oui, facilement entretenues, matériaux remplaçables
Durabilité environnementale	Élevée (matériaux locaux, biodégradables, énergie grise faible)	Élevée (ressources locales, peu de transport, adaptation au contexte)

Figure 80 : Tableau synthèse des projets vernaculaires en bambou.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

L'étude des **habitats vernaculaires en bambou** tels que les **Bahay Kubo** aux Philippines et les **maisons flottantes du lac Inle** en Birmanie met en lumière une architecture connectée à son environnement, à la fois **sobre**, **ingénieuse** et **résiliente**. Ces constructions, faites de **matériaux locaux renouvelables**, répondent aux contraintes climatiques et culturelles par des solutions simples : surélévation, ventilation naturelle, plans ouverts et flexibles. Leur caractère **démontable** et **réparable** traduit une compréhension fine du cycle de vie des matériaux.

Ces logiques constructives se retrouvent aujourd'hui dans des **projets contemporains** qui cherchent à réduire leur empreinte écologique. L'architecture moderne puise dans ces modèles pour concevoir des bâtiments plus durables : **bambou**, **matériaux biosourcés**, ventilation naturelle, intégration paysagère... Les **principes du vernaculaire** redeviennent une source d'inspiration pour penser une architecture **résiliente** face aux enjeux climatiques.



Chapitre 2 :

Construire avec la terre
crue

Introduction

Ce chapitre avait pour objectif d'analyser un plus grand nombre de projets. Toutefois, les contraintes de temps et la disponibilité restreinte des informations et des architectes ont limité cette étude. Voici quelques projets supplémentaires qui auraient mérité d'être examinés :

- Francis Kéré – Lycée Shorge
- Francis Kéré – Léo Doctors' Housing
- Martin Rauch – Centre d'accueil des visiteurs de l'institut ornithologique
- haas cook zemrich STUDIO 2050, Lehm Ton Erde Baukunst GmbH - Alnatura Arbeitswelt
- Assemble + BC architects & studies Lot 8, Magasin électrique

Meti Handmade School

Anna Heringer

- Localisation : Rudrapur, Bangladesh (Asie)
- Climat : Climat tropical
- Fonction : Etablissement scolaire
- Surface totale : 325 m²
- Composition : 1 étage
- Matériau principal : terre crue, bambou
- Année de construction : 2017

Contexte et Enjeux :

Le projet Handmade School d'Anna Heringer a été construite en 2007 en collaboration avec Eike Roswag. Le projet met l'accent sur l'utilisation de matériaux locaux et sur des techniques de constructions traditionnelles (Heringer & Gauzin-Müller, 2024). L'école a été conçue pour être réalisée en étroite collaboration avec la population locale et les artisans, renforçant ainsi les liens communautaires et valorisant les compétences traditionnelles et artisanales en présence dans la construction de cette région (ArchDaily, 2010). La conception du bâtiment a été pensée de manière à offrir un endroit permettant le développement d'un bon apprentissage pour les enfants tout en respectant les ressources de l'environnement (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).

Dans le livre *Form Follows Love*, Anna Heringer dit : « je voulais prouver que leur utilisation ne se limite pas à de petites huttes sombres et qu'ils permettent également diriger de grandes structures témoignant de leurs fantastiques qualités.» (Heringer & Gauzin-Müller, 2024, p. 39).

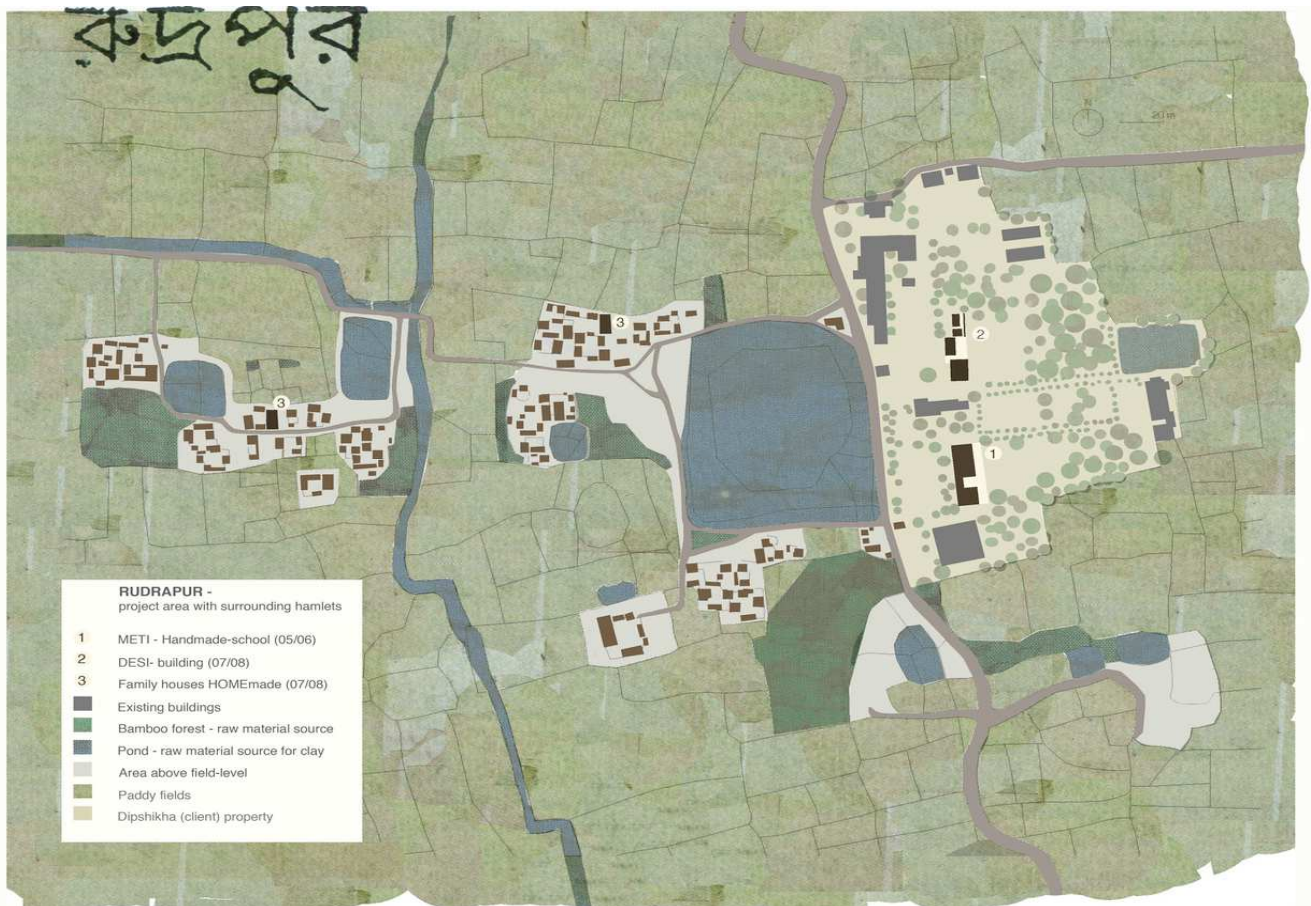


Figure 81 : Plan directeur de Rudrapur avec le projet Meti Handmade School.

Source : <https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roswag>



Figure 82 : Projet Meti Handmade School photo sur le côté d'Anna Heringer. © Kurt Hoerbst
Source : <https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roszag>



Figure 83 : Photo de l'intérieur du projet Meti Handmade School. © Kurt Hoerbst
Source : <https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roszag>

Approche Écologique :

Le projet a été réalisé en utilisant principalement du bambou, un matériau abondant et renouvelable dans la région (Omrana, 2017). Les murs de l'école ont été façonnés en terre crue et mis-en-œuvre grâce à la technique de la bauge à partir d'un mélange de terre locale et de paille de riz (Heringer & Gauzin-Müller, 2024). Ce projet a également permis de valoriser les compétences locales et de renforcer les liens communautaires au sein de Rudrapur (Omrana, 2017 ; Heringer & Gauzin-Müller, 2024).

Fonctionnalité et Confort :

Le projet a été conçu avec l'objectif de créer un environnement d'apprentissage empreint de joie et de créativité. Plus qu'un simple espace pédagogique, ce bâtiment s'adresse principalement aux enfants, en privilégiant leur bien-être et leur imagination plutôt qu'une approche académique stricte. Dans cette optique, des espaces évoquant des grottes ont été intégrés, offrant des zones de repli intime, où les enfants peuvent se sentir protégés et en sécurité. Ces choix architecturaux reflètent une compréhension profonde des besoins humains fondamentaux (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).



Figure 84 : Projet Meti Handmade School d'Anna Heringer. © Kurt Hoerbst
Source : <https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roszag>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur
- Epaisseur du mur : ~ 40 cm
- Technique utilisée : La bauge
- Provenance de la terre : Locale

Ce projet combine deux matériaux principaux : la terre crue et le bambou. Toutefois, l'analyse structurelle et constructive porte essentiellement sur la mise en œuvre de la terre crue.

D'après les photos disponibles et par comparaison avec d'autres projets d'Anna Heringer, il semble que le bâtiment repose sur des fondations en briques de terre cuite, probablement recouvertes d'un enduit de parement. Ces fondations **dépassent d'environ 40 cm du sol** afin de protéger les murs en terre de l'humidité, et une membrane de protection y a été ajoutée.

Sur ces fondations sont construits des murs porteurs de **40 cm d'épaisseur**, réalisés en terre crue selon la technique de la bauge. La construction s'effectue manuellement : chaque couche de terre est laissée à sécher, taillée, puis une nouvelle couche est ajoutée de la même manière (Omrania, 2017 ; Heringer & Gauzin-Müller, 2024). **La terre est mélangée à de la paille**, ce qui augmente la rugosité des murs et ralentit l'écoulement de l'eau sur la façade (Heringer & Gauzin-Müller, 2024). Sur la dernière couche du mur est inséré un ensemble de trois bambous superposés, formant ainsi la base du plafond (ArchDaily, 2010). La structure du plancher est réalisée en bambou, vraisemblablement recouverte d'une finition en terre coulée pour obtenir une surface lisse.

Le reste de la construction est en bambou : la toiture en tôle est soutenue par une charpente en bambou, et son débord important protège les murs en terre de la pluie.

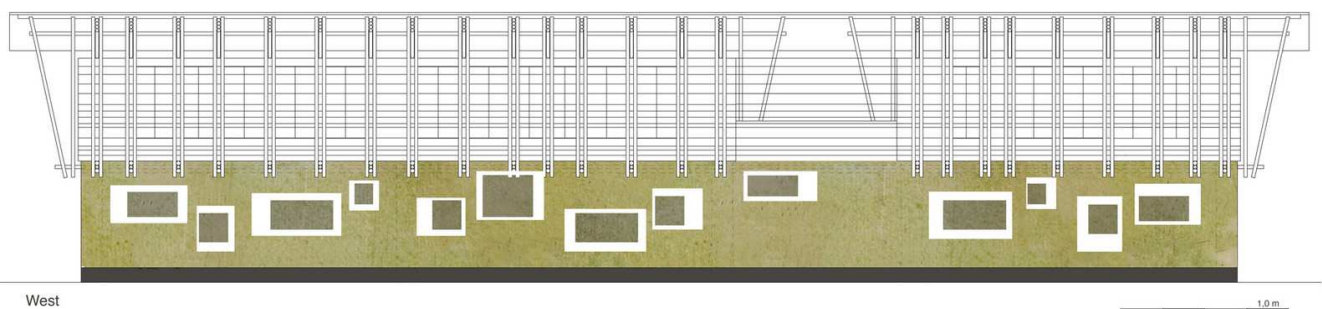


Figure 85 : Elévation ouest Projet Meti Handmade School d'Anna Heringer.
Source : <https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roszag>

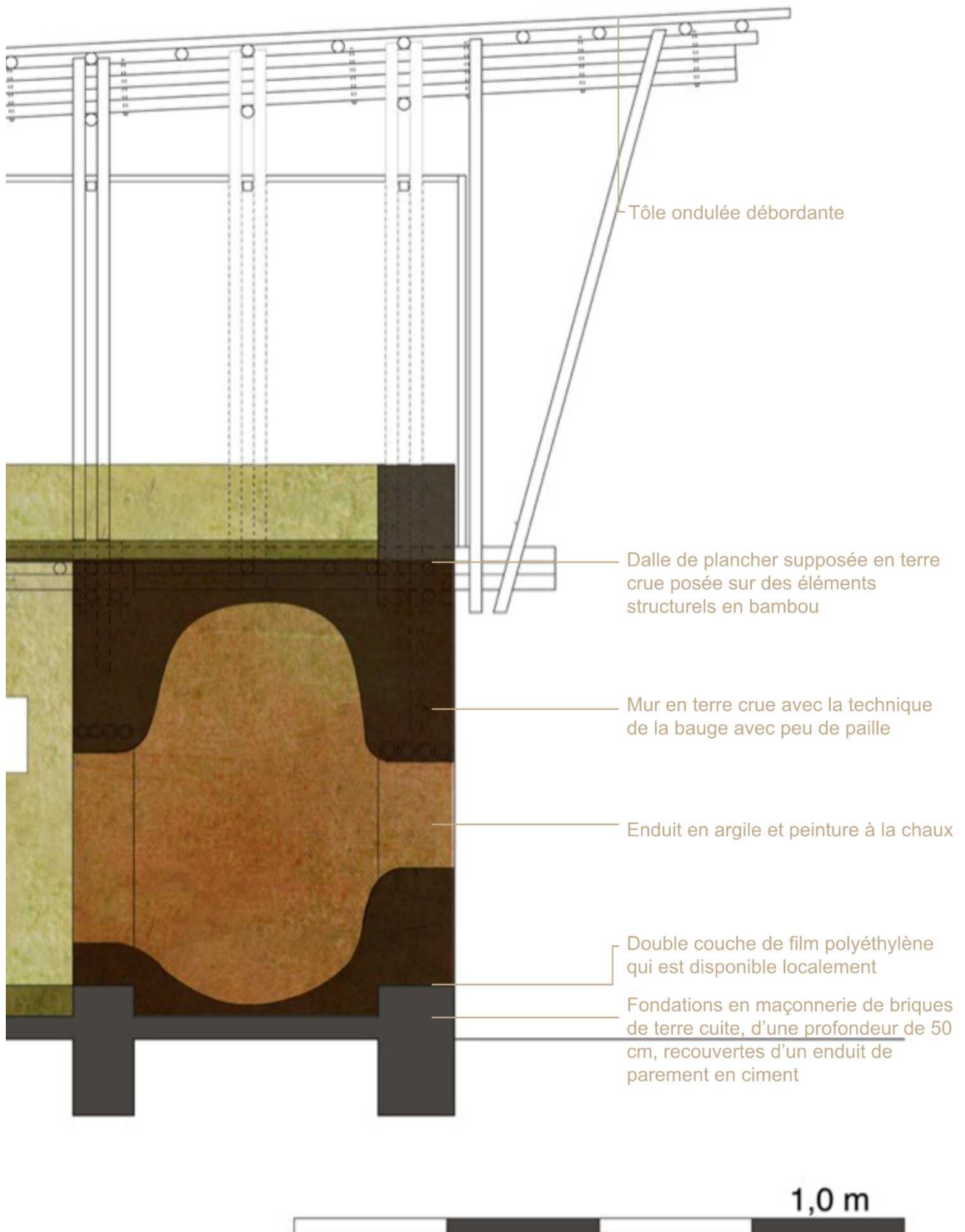


Figure 86 : Section du Projet Meti Handmade School d'Anna Heringer.
 Source : <https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roszag>

Analyse critique et analytique du projet

La **réversibilité** de la construction en **terre crue** et en **bambou** permet une **déconstruction relativement simple**, avec la possibilité de **réutiliser** les matériaux ou de les laisser retourner à leur état naturel. Le bambou, matériau léger, flexible et attaché par cordage, est facilement réutilisable dans d'autres constructions, tandis que la terre, une fois **concassée**, peut être remise au sol ou intégrée dans de nouveaux projets, **limitant ainsi considérablement les déchets**. Ce projet repose sur des **techniques locales** spécifiquement adaptées au contexte du **Bangladesh**. La terre crue et le bambou, disponibles en grande quantité, soutiennent non seulement l'économie régionale mais aussi la **transmission des savoir-faire traditionnels**.

D'un **point de vue analytique**, cette méthode constructive s'avère particulièrement bien adaptée au **climat tropical et humide** du Bangladesh. Le recours à des ressources **locales et renouvelables** comme la terre et le bambou permet de **réduire l'empreinte carbone**, notamment en limitant les besoins en transport. Il convient également de souligner que ce type de construction participe à la **durabilité** des matériaux employés. En effet, la **mise à distance du sol** des murs en terre, ainsi que leur **protection par une toiture en surplomb**, contribuent à **prolonger leur durée de vie** et à assurer une meilleure **résistance aux intempéries**.

Gando Primary School

Francis Kéré

- Localisation : Gando, Burkina Faso
- Climat : Climat tropical
- Fonction : Etablissement scolaire
- Surface totale : 520 m²
- Composition : De plain-pied
- Matériau principal : terre crue
- Année de construction : 1998-2001

Contexte et Enjeux :

Le projet *Gando Primary School* est une école primaire conçue par Francis Kéré (Kéré Architecture, s. d.-a) situé au Burkina Faso.

L'objectif de cette réalisation était non seulement de répondre à la nécessité croissante d'infrastructures scolaires dans la région, mais aussi de démontrer qu'il est possible de créer des espaces confortables, durables et adaptés au climat local, tout en disposant de ressources limitées (Kéré Architecture, s. d.-a).

Le principal défi consistait à offrir un environnement intérieur frais, naturellement ventilé et protégé des fortes chaleurs, en utilisant des matériaux locaux et des techniques constructives accessibles à la communauté (Kéré Architecture, s. d.-a).

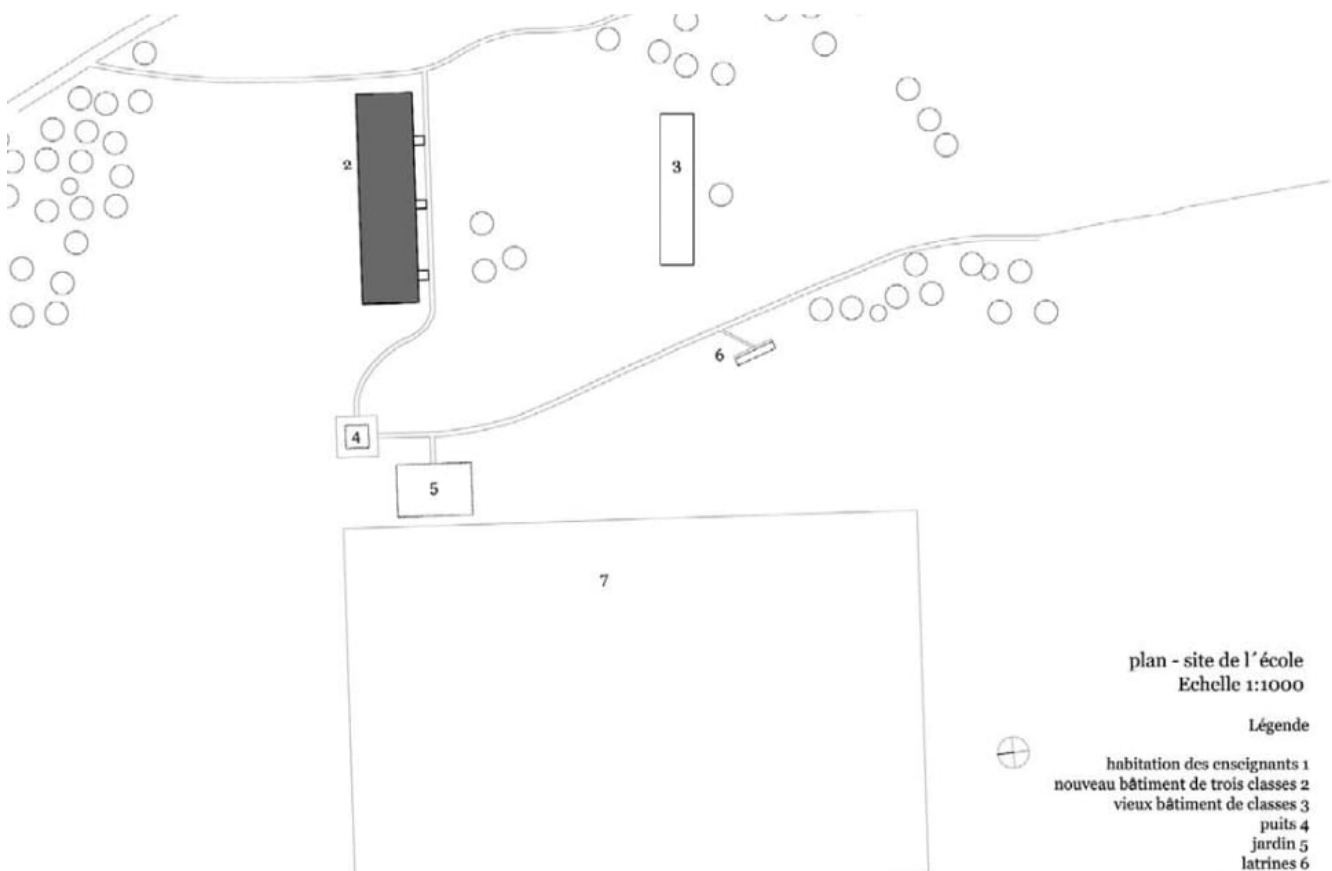


Figure 87 : Plan d'implantation de l'école primaire Gando de Francis Kéré.
Source : <https://archidatum.com/gallery?id=4004&node=4005>



Figure 88 : Vue du côté de l'école primaire de Gando. © Erik-Jan Ouwerkerk.
Source : <https://www.kerearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>



Figure 89 : École primaire de Gando.. © Siméon Duchoud.
Source : <https://www.kerearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>

Approche Écologique :

Le projet a exploité la terre à disposition localement (ArchDaily, 2016) et a mobilisé également la main-d'œuvre locale, impliquant les habitants dans le processus de construction (ArchDaily, 2016).

Fonctionnalité et Confort :

Animé par son vécu, Francis Kéré, souhaitait offrir une école de qualité afin de garantir aux élèves, de bonnes conditions pour apprendre. Ayant lui-même connu une école mal conçue, il souhaitait développer un projet d'école agréable et confortable à vivre (ArchDaily, 2016). Le projet de l'École Primaire de Gando illustre comment l'architecture peut améliorer la vie des locaux en adaptant la construction avec le climat local. Alliant durabilité et simplicité, Francis Kéré offre aux enfants du village de Gando, un lieu d'éducation.



Figure 90 : Projet Gando Primary School de Francis Kéré. © Siméon Duchoud.
Source : <https://www.kerearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur
- Epaisseur du mur : ~ 50 cm
- Technique utilisée : BTC (stabilisé 8% de ciment)
- Provenance de la terre : Locale

À partir des photos, nous pouvons observer la présence d'un soubassement en pierre (ArchDaily, 2016). Celui-ci élève le bâtiment d'environ 50 cm par rapport au sol naturel, permettant ainsi une meilleure protection contre l'humidité et les intempéries. Ce soubassement constitue la base de la construction et est composé d'un remplissage de pierres associé à une fondation continue en béton.

Les murs porteurs sont réalisés en briques de terre comprimée (BTC), fabriquées à partir d'un mélange de terre crue locale stabilisée avec du ciment (Kéré Architecture, s. d.). Bien que la teneur précise en ciment ne soit pas explicitement communiquée dans les documents de référence, une proportion de 8 % est généralement supposée pour ce type de construction.

Concernant les plafonds des salles de classe, il repose sur une sous-structure fine, sur laquelle les briques de terre comprimée (BTC) viennent se positionner (cf. figure 92). Aucun matériau précis n'est mentionné pour cette sous-structure ; cependant, au vu des photographies, il est possible d'émettre l'hypothèse qu'il s'agisse de bois. Le plafond est constitué en BTC et a été composé sans mortier (Kéré Architecture, s. d.-a).

Au-dessus des murs porteurs, une ceinture en béton couvre l'ensemble du bâtiment. Perpendiculairement à cela, d'autres éléments en béton sont disposés à intervalles réguliers. Ces éléments permettent à la structure de la toiture de venir s'y ancrer (cf. figure 91).

La toiture est constituée de tôles ondulées et présente un important débord par rapport aux murs. Ce débord protège efficacement les parois en terre contre la pluie directe (Kéré Architecture, s. d.-a; ArchDaily, 2016). La toiture est portée par une structure en acier légère et est volontairement surélevée au-dessus des murs afin de favoriser la ventilation naturelle des espaces intérieurs (cf. figure 88).



Figure 91 : Photo de la toiture de l'école de Gando. © Kéré Architecture.
Source : <https://www.kerearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>

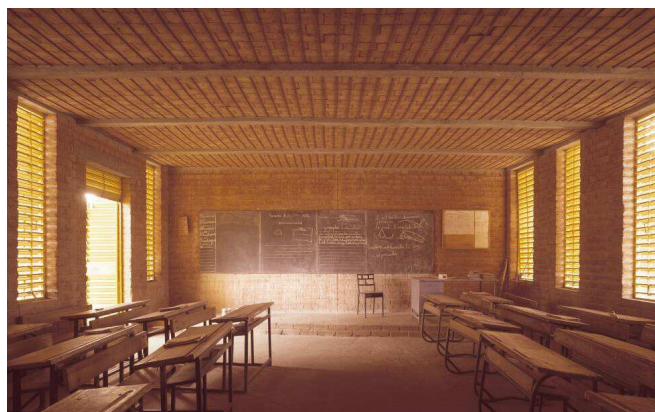
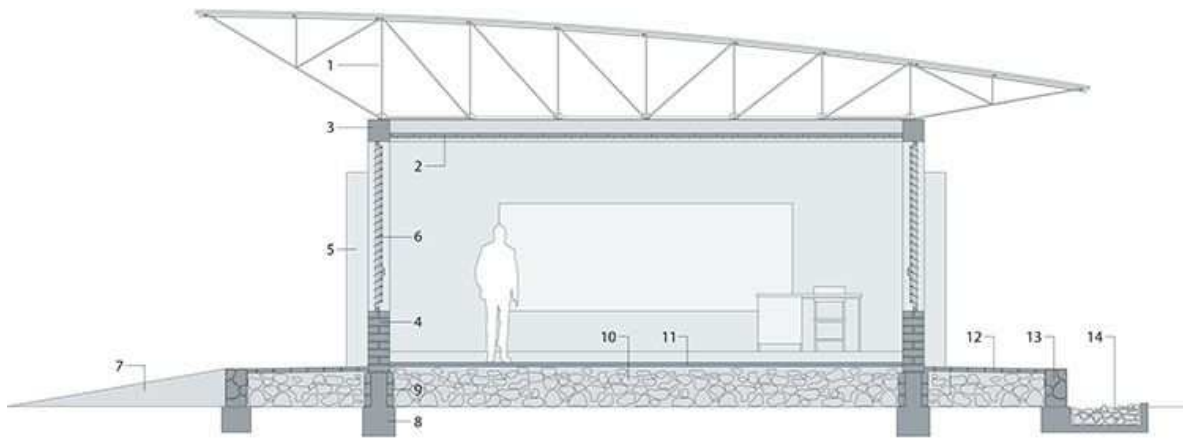


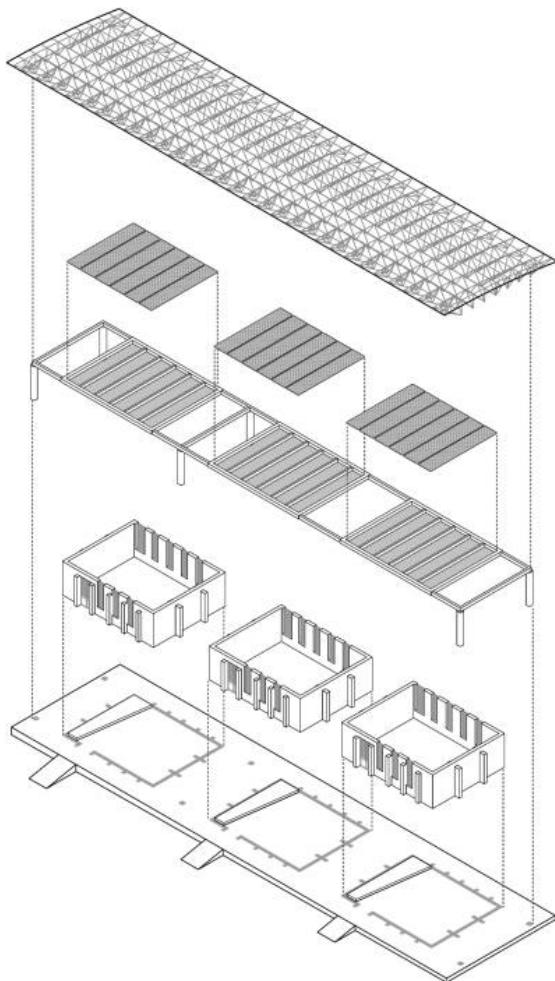
Figure 92 : Intérieur de l'école primaire de Gando. © Siméon Duchoud. Gando
Source : <https://www.kerearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>



- | | | | |
|---|--|---|---|
| 1 ROOF
roof membrane of corrugated metal sheets, girders of welded reinforcing steel | 5 BUTRESSES | 9 PERMANENT SHUTTERING
edgewise bricked-up adobe | 13 EDGE STRIPS TERRACE
natural stone masonry |
| 2 SUSPENDED CEILING
clay bricks | 6 WINDOWS
steel lamella elements | 10 CLAY AND STONE FILLING | 14 RAINWATER CONDUCTOR
filled with gravel |
| 3 RING BEAM
reinforced concrete | 7 STEPS
Natural stone or concrete | 11 COMPRESSED CLAY
traditionally stamped clay | |
| 4 SUPPORTING CLAY WALLS | 8 CONTINUOUS FOUNDATION
non-reinforced concrete | 12 TERRACE COVERING
clay bricks | |

Figure 93 : Coupe détail du projet Gando Primary School.

Source : <https://www.infobuildenergia.it/progetti/scuola-gando-burkina-faso-bioclimatica-francis-kere/>



Structure en acier avec le toit en tôle ondulée

Plafond en BTC assemblée à sec

Ceinture du bâtiment en béton

Mur en BTC en terre crue

Dalle de sol

Figure 94 : Axonométrie éclatée de l'école primaire de Gando.

Source : <https://www.infobuildenergia.it/progetti/scuola-gando-burkina-faso-bioclimatica-francis-kere/>

Analyse critique et analytique :

La **réversibilité** de ce projet est **partielle**. En effet, l'architecte a intégré certains matériaux **non réversibles** au sein d'une construction utilisant pourtant des ressources naturelles. Le recours au **ciment** dans les **briques de terre comprimée (BTC)** empêche toute **réutilisation directe** de la terre, car une fois stabilisée au ciment, elle ne peut plus retourner à son état initial. L'usage du **béton**, bien que problématique du point de vue environnemental, pourrait envisager une **réutilisation partielle** sous forme de gravats une fois concassé. En revanche, la **structure de toiture**, construite avec des matériaux plus légers ou démontables, présente un **potentiel de réemploi** intéressant.

D'un point de vue analytique, le projet reste **cohérent** dans son ensemble. L'usage du ciment limite certes la réversibilité, mais il est essentiel de noter que **l'ensemble du bâtiment aurait pu être réalisé en béton**. Le fait d'avoir malgré tout choisi d'utiliser la **terre locale**, disponible sur site, témoigne d'une **volonté de réduction de l'impact environnemental** et d'un **compromis constructif** entre durabilité et contraintes techniques.

Haus Rauch

Roger Boltshauser, Martin Rauch

- Localisation : Schlins, Autriche
- Climat : Climat tempéré
- Fonction : Résidence privée
- Surface totale : 200 m²
- Composition : 2 étages
- Matériau principal : Terre crue, bois
- Année de construction : 2004-2008

Contexte et Enjeux :

La Haus Rauch est la résidence privée de l'architecte et expert en terre crue Martin Rauch, réalisée en collaboration avec Roger Boltshauser. Ce bâtiment se situe dans un contexte rural en Autriche.

Ce projet s'inscrit dans une démarche expérimentale, à la croisée de l'artisanat, de l'architecture contemporaine et de l'innovation écologique. L'objectif fondamental était de démontrer que la terre crue, souvent perçue comme un matériau traditionnel ou vernaculaire, pouvait s'inscrire pleinement dans une esthétique architecturale contemporaine (The Architectural Review, 2020).

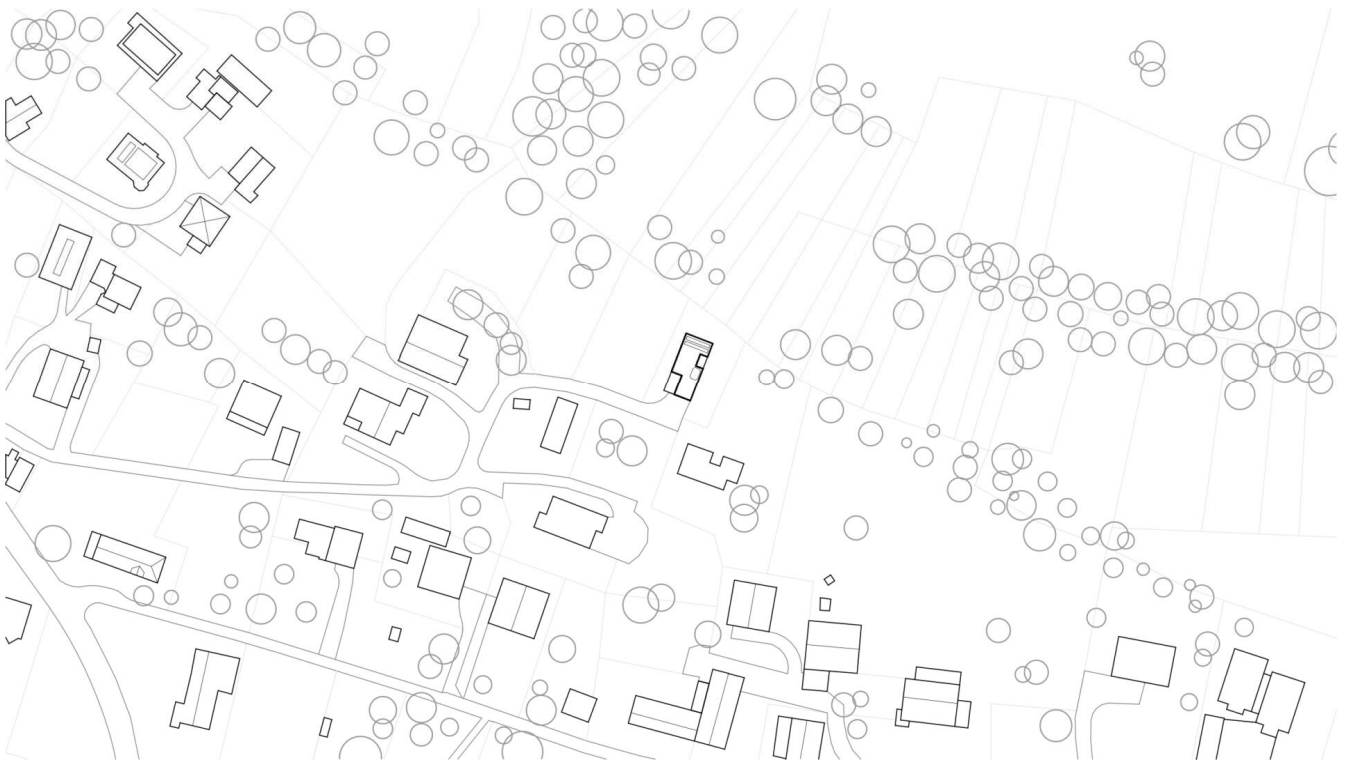


Figure 95 : Plan de situation de la Haus Rauch.
Source : <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>



Figure 96 : Photos de l'intérieur du projet Haus Rauch. © Beat Bühler
Source : <https://www.architecturelab.net/rauch-house-roger-boltshauser-plus-martin-rauch/>

Approche Écologique :

Ce projet utilise la terre crue en adoptant la technique du pisé (Frugalité Créative, s. d.). La terre utilisée provient directement du site (Giuroiu, 2025).

Fonctionnalité et Confort :

Les espaces de vie et de travail sont conçus pour favoriser une ambiance chaleureuse et confortable. La terre crue, grâce à ses propriétés hygrométrique, régule naturellement l'humidité intérieure et contribue à une qualité de l'air saine. The House Rauch est une vitrine contemporaine de l'architecture en terre crue, prouvant qu'elle peut répondre aux exigences modernes tout en offrant un cadre de vie écologique et esthétique (Frugalité Créative, s. d.).



Figure 97 : Photo du projet The House Rauch. © Beat Bühler
Source : <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pid=7>

Aspect structurel et constructif :

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| - Structure : Mur porteur | - Technique utilisée : Le pisé |
| - Epaisseur du mur : ~ 45 cm | - Provenance de la terre : Locale |

Il n'y a pas d'information explicite et claire concernant les fondations de la maison. Toutefois, à partir de l'analyse du détail technique, on comprend qu'aucun béton n'a été utilisé. À la place, une couche de gravier sert de base, surmontée d'un mélange de liège, de pierre et d'argile, pour aboutir à une finition de sol en argile sablée.

Les murs porteurs sont réalisés en terre crue, selon la technique du pisé. Ces murs présentent une épaisseur de 45 cm et sont construits avec une terre extraite localement, sans stabilisation chimique (Boltshauser Architekten AG, s. d.). Afin de renforcer leur résistance à l'érosion, des strates de briques de terre sont intégrées à intervalles réguliers (cf. figure 98) dans les murs de pisé (Frugalité Créative, s. d.). Comme l'illustre la figure 100, le mur principal affiche une épaisseur de 45 cm, sans compter les couches additionnelles nécessaires aux performances thermiques.

Les dalles de plancher sont construites en bois (Boltshauser Architekten AG, s. d.). Bien que peu d'informations soient fournies à ce sujet, l'analyse des figures permet de distinguer deux types de planchers :

- Le premier associe des poutres en T et des briques cuites.
- Le second est constitué de solives en bois avec un remplissage d'un mélange de terre et de liège.

La toiture adopte la même structure que ce second type de plancher et est recouverte d'un dallage en pierre (cf. figure 99).



Figure 98 : La façade du projet Haus Rauch.
Source : <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pid=7>

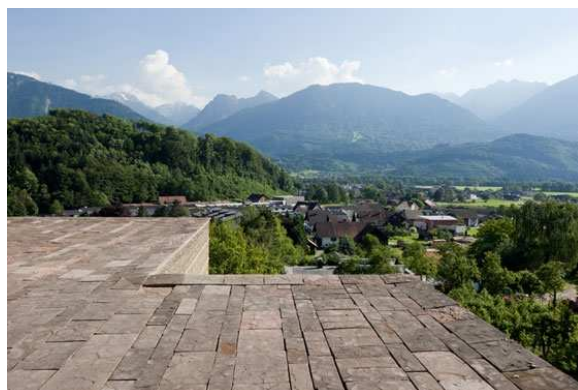


Figure 99 : Battre Bühler Haus Rauch.
Source : <https://www.architonic.com/de/project/boltshauser-architekten-lehmhaus-rauch/5100620>

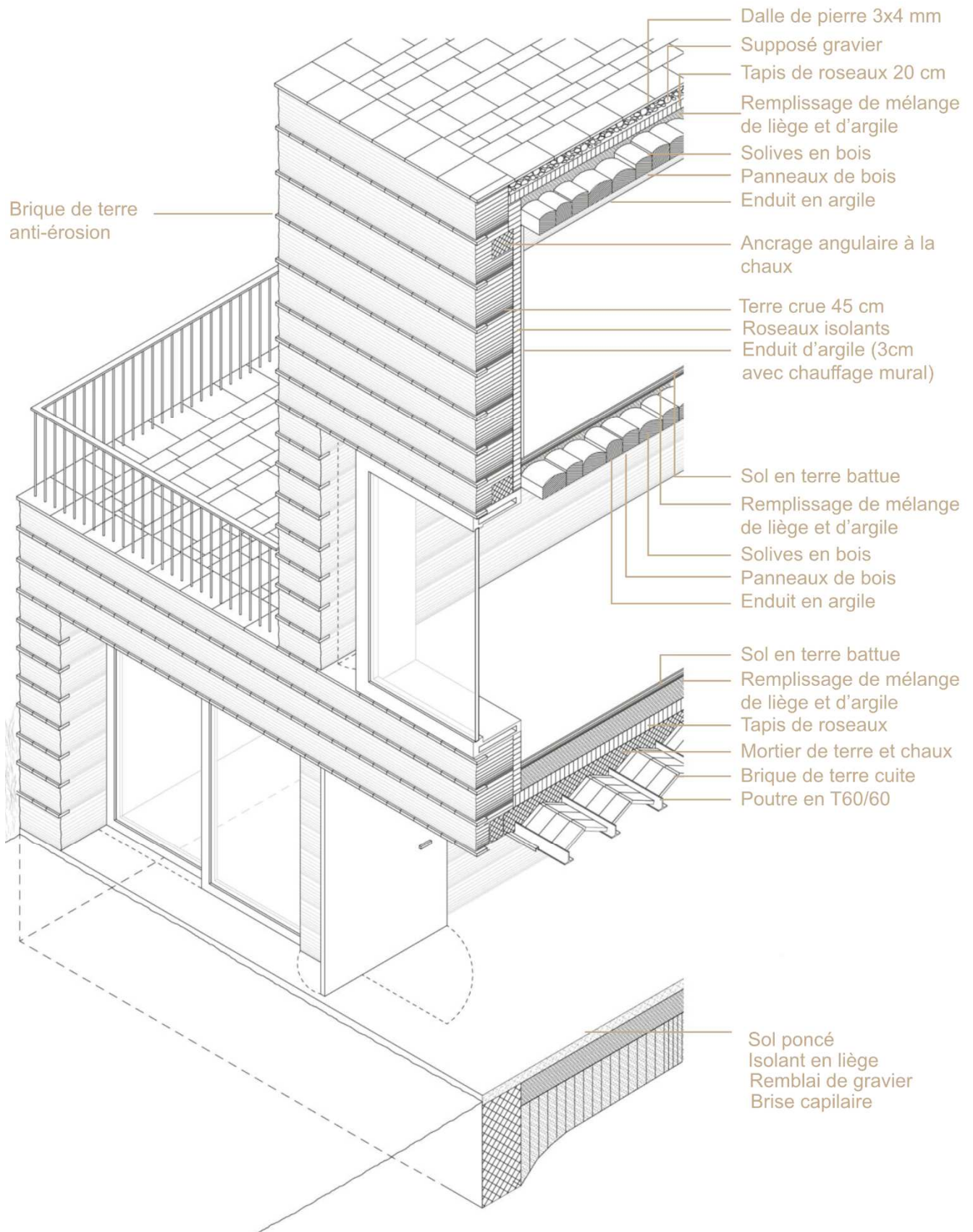


Figure 100 : Axonométrie des différentes couches du mur du projet Haus Rauch.
 Source : <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>

Analyse critique et analytique :

La **réversibilité** du projet est tout à fait **envisageable**. En effet, la terre n'ayant subi **aucun ajout de stabilisant**, son retour à l'état naturel est entièrement possible. Un démontage suivi d'un concassage des murs serait nécessaire en amont. Par ailleurs, les strates de briques de terre crue, intégrées à intervalles réguliers dans le mur en pisé, peuvent être réutilisées dans d'autres projets, renforçant ainsi l'économie circulaire du matériau. Concernant le bois utilisé, bien que l'absence de coupe technique ne permette pas d'analyser précisément son positionnement et ses systèmes de fixation, il est reconnu comme un matériau **durable** et généralement **réversible**. Il est donc raisonnable d'émettre une hypothèse positive quant à son potentiel de réemploi.

D'un point de vue analytique, le projet se distingue par l'utilisation de **terres extraites directement du site de construction**, une approche parfaitement cohérente avec les ambitions du projet, tout en **réduisant significativement l'impact lié au transport des matériaux**. Une spécificité particulièrement intéressante du projet réside dans **l'intégration de strates de briques de terre** à intervalles réguliers dans les murs en pisé. Ce choix technique contribue à **limiter l'érosion** et témoigne d'une **maîtrise fine des contraintes liées à la terre crue**.

Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma

Atelier Régis Rouldil

- Localisation : Paris, France (Europe)
- Climat : Climat tempéré
- Fonction : Equipement public scolaire
- Surface totale : 308 m²
- Composition : De plain-pied
- Matériau principal : Terre crue, bois
- Année de construction : 2022

Contexte et Enjeux :

Située au cœur de Paris, non loin de la tour Eiffel, et dans le jardin du Palais de l'Élysée (dit palais de l'Alma), cette crèche pouvant accueillir jusqu'à 24 enfants, s'inscrit dans un environnement urbain tout en étant préservée de la voie publique, elle offre ainsi un espace intime et de quiétude (Atelier Régis Rouldil, communication personnelle, 23 février 2025).



Figure 101 : Plan de situation de la crèche de 24 berceaux au Palais de l'Alma.

Source : Atelier Régis Rouldil (2025, 23 février). Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. Document transmis personnellement.



Figure 102 : Photo de l'ensemble de la crèche.
Source : Atelier Régis Roudil. (2025, 23 février). Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. Document transmis



Figure 103 : Photo de l'entrée de la crèche.
Source : Atelier Régis Roudil. (2025, 23 février). Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. Document transmis personnellement.

Approche écologique :

L'usage de la terre crue comme matériau principal permet de réduire considérablement l'impact carbone du bâtiment (Chroniques D'Architecture, 2023). Le pisé, utilisé pour les murs porteurs offre d'excellentes performances en matière de régulation thermique et hygrométrique, améliorant ainsi le confort intérieur. La terre provient de la briqueterie Dewulf à Allonne, dans l'Oise, tandis que le bois utilisé est d'origine française (Chroniques D'Architecture, 2023). Dans une démarche visant à réduire encore davantage l'empreinte carbone, ce bois a été acheminé par voie fluviale (Chroniques D'Architecture, 2023).

Fonctionnalité et Confort :

Conçue pour accueillir de jeunes enfants, la crèche met l'accent sur un environnement apaisant et aux couleurs douces (Chroniques D'Architecture, 2023). Les espaces sont conçus pour être modulables, permettant une adaptation aux différents besoins (Chroniques D'Architecture, 2023).



Figure 104 : Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. ©11h45 – Florent Michel
Source : <https://www.regisroudil.fr/projet/creche-de-lalma/>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Poteau/poutre et mur de refend en terre
- Technique utilisée : Pisé, enduit (non stabilisé)
- Epaisseur du mur : ~ 45 cm
- Provenance de la terre : Aucune information

Ce projet repose sur une dalle en béton armé de 25 cm d'épaisseur, surmontée d'un soubassement en béton d'environ 50 cm de hauteur. Ce soubassement permet de surélever la structure par rapport au sol naturel, renforçant ainsi la durabilité du bâtiment en le protégeant de l'humidité et des remontées capillaires (cf. figure 107).

Les murs porteurs sont réalisés en terre crue, selon la technique du pisé, avec une épaisseur de 45 cm. Pour améliorer leur solidité et leur durabilité, de la chaux est systématiquement ajoutée toutes les six couches, et chaque couche est soigneusement compactée (Atelier Régis Roudil, communication personnelle, 23 février 2025). Une attention particulière est portée aux angles, où la chaux est intégrée à chaque couche afin de garantir une meilleure stabilité (Chroniques D'Architecture, 2023). Cela lui confère une certaine esthétique et souligne l'horizontalité du projet. Les murs sont également complétés par une isolation thermique afin d'optimiser les performances énergétiques du bâtiment (Atelier Régis Roudil, communication personnelle, 23 février 2025). À l'intérieur, les finitions sont assurées par des plaques de plâtre ou des habillages en bois, créant une atmosphère chaleureuse et confortable.

La charpente de la toiture est constituée de poutres en épicea lamellé-collé (2 x 100/480 mm), portant une toiture végétalisée qui renforce l'intégration du bâtiment dans son environnement tout en améliorant ses qualités thermiques et écologiques (Atelier Régis Roudil, communication personnelle, 23 février 2025).



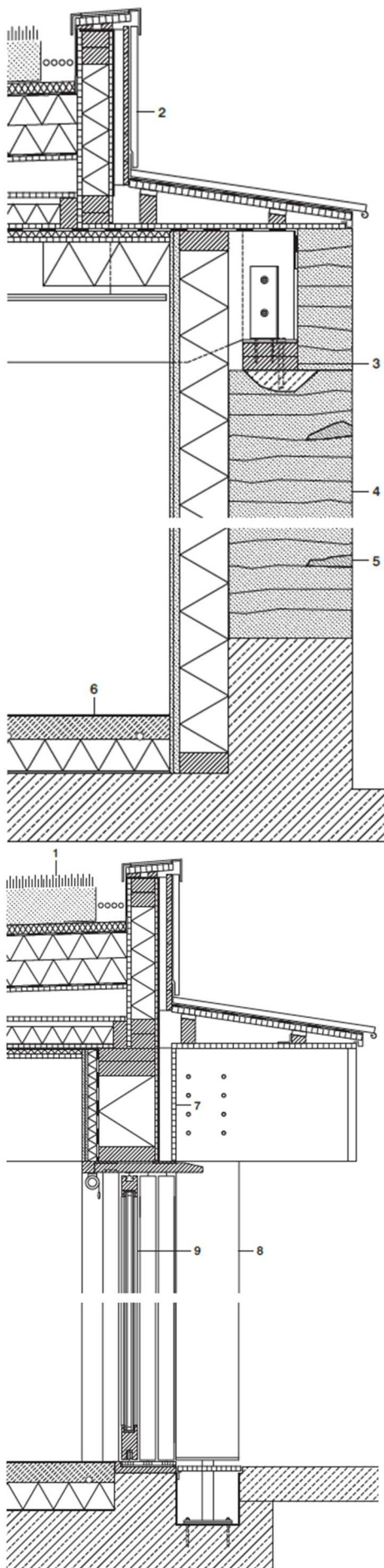
Figure 105 : Dispositif de coffrage pour la mise en œuvre du pisé.
Source : Atelier Régis Roudil. (2025, 23 février). Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. Document transmis personnellement.



Figure 106 : Terre utilisée pour le projet de la crèche du Palais de l'Alma.
Source : Atelier Régis Roudil. (2025, 23 février). Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. Document transmis personnellement.



Figure 107 : Photo du côté de la crèche.
Source : Atelier Régis Roudil. (2025, 23 février). Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. Document transmis personnellement.



Section
scale 1:20

- 1 extensive greening
150 mm substrate
40 mm drainage layer
EPDM sealant
2× 110 mm mineral wool thermal insulation; vapour barrier
18 mm OSB
60/max. 180 mm bevelled plate 3% to falls; 18 mm OSB
60/120 mm wood blocking
80 mm inlaid wood fibre insulation panel and 18 mm OSB
vapour barrier
2× 100/480 mm glued laminated spruce beam
25 mm inlaid fleece lined glass wool acoustic panel and 19 mm spruce three layer panel; hanger
22 mm spruce perforated acoustic panel
- 2 1 mm titanium zinc standing seam roofing
wood sheathing
battens/back ventilation
EPDM sealant
15 mm OSB
45/100 mm wood blocking; 100 mm inlaid mineral wool thermal insulation
22 mm OSB
- 3 ring beam:
2× 50/200 mm oak beam fixed with M16 threaded rod to concrete anchor, 1000 mm spacing

- 4 exterior wall:
450 mm rammed earth; loam mortar bed joints
160 mm wood post
160 mm inlaid wood wool thermal insulation
25 mm loam construction panel
loam render
- 5 trass lime mortar erosion proofing
- 6 recycled natural rubber flooring
80 mm heating screed
120 mm PU thermal insulation
3.5 mm impact soundproofing fleece
250 mm reinforced concrete slab
- 7 27 mm larch three layer panel
60/40 mm battens/back ventilation
diffusion open facade layer
12 mm OSB
60/240 mm wood blocking
240 mm inlaid wood wool thermal insulation; vapour barrier
45 mm mineral wool thermal insulation
2× 12.5 mm gypsum fibre board
- 8 140/280 mm glued laminated douglas fir post
- 9 sliding door:
double insulation glazing with inert gas fill:
2× 4 mm laminated safety glass + 16 mm cavity + 2× 4 mm laminated safety glass, $U_g = 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ in larch frame

Figure 108 : Détails techniques des parois de la crèche.

Source : Atelier Régis Roudil. (2025, 23 février). Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma. Document transmis personnellement.

Analyse critique et analytique :

La **réversibilité** du projet est tout à fait **envisageable**, grâce à l'utilisation de matériaux **naturels et peu transformés** comme la **terre crue** et le **bois**. La terre crue, bien que ne pouvant être réutilisée telle quelle après démontage, peut parfaitement être revalorisée dans d'autres projets, notamment sous forme de **mélange terre/chaux**, reconnu pour améliorer les performances du matériau tout en conservant une faible empreinte environnementale. Le **béton**, présent uniquement dans les **semelles de fondation et pour une mise à distance** du mur de terre, limite l'impact environnemental tout en assurant la stabilité structurelle du bâtiment. Bien qu'il soit difficilement réutilisable tel quel, il peut être **concassé** pour être utilisé comme **granulat recyclé**, notamment pour remettre un sol à niveau ou dans des ouvrages secondaires. Concernant le **bois**, il est possible de le réutiliser.

D'un point de vue analytique, ce projet constitue un **exemple remarquable de maîtrise de la terre crue**, non seulement dans sa mise en œuvre mais aussi dans l'intégration de solutions innovantes pour pallier ses faiblesses. Le recours à **l'ajout de chaux à intervalles réguliers** dans le pisé est une **approche particulièrement ingénieuse**, à la fois technique et esthétique. Construire un bâtiment en terre crue au cœur de **Paris** représente un **véritable défi**, tant technique que réglementaire, et le résultat témoigne d'une **réussite exemplaire**. L'usage très limité du béton, cantonné aux fondations, et l'intégration d'une **toiture végétalisée** renforcent l'engagement écologique du projet. Seul bémol : la **provenance exacte de la terre** utilisée n'est pas précisée, ce qui aurait permis de mieux évaluer **l'impact du transport** des matériaux.

CEM Kamanar

DAWOffice

- Localisation : Thionk Essyl, Sénégal (Afrique)
- Climat : Climat tropical
- Fonction : Etablissement public scolaire
- Surface totale : 1900 m²
- Composition : De plain-pied
- Matériau principal : terre crue
- Année de construction : 2016-2021

Contexte et Enjeux :

La construction de cette école secondaire située au Sénégal, est capable d'accueillir jusqu'à 500 élèves (Archello, s. d). L'un des principaux enjeux était de réduire les coûts de construction, d'où le choix de la terre, un matériau abondant dans la région (Archello, s. d). L'école met ainsi en avant des solutions constructives durables et économiques.



Figure 109 : Plan d'implantation du projet CEM Kamanar de DAWOffice.
Source : <https://archello.com/project/cem-kamanar>



Figure 110 : Projet CEM Kamanar de DAWOffice.
@Claudia Mauriño
Source : <https://dawoffice.com/cem-kamanar/>



Figure 111 : Vue de l'intérieur du projet CEM Kamanar.
Source : <https://dawoffice.com/cem-kamanar/>

Approche Écologique :

L'utilisation de la terre dans le projet est un choix écologique particulièrement pertinent. En plus de réduire l'empreinte carbone du bâtiment, la terre est un matériau local, abondant et facile à manipuler par les populations locales. Le façonnage des BTC (briques de terre comprimée) est effectué directement sur le chantier, ce qui permet de minimiser les transports et les émissions associées (Archello, s. d). Cette approche favorise non seulement l'utilisation de ressources locales, mais elle soutient également l'implication des communautés locales dans la construction, renforçant ainsi la dimension durable et participative du projet (Archello, s. d).

Fonctionnalité et Confort :

L'architecture du CEM Kamanar offre un confort appréciable aux occupants à travers une ventilation naturelle réfléchie. En effet, l'organisation des espaces favorise la circulation de l'air, réduisant l'effet de chaleur et améliorant les conditions d'apprentissage (Archello, s. d). Le projet a été conçu selon une approche modulaire, permettant une extension future grâce à sa structure basée sur une grille (DAWOffice, s. d.).



Figure 1 : Photo du projet CEM Kamanar de DAWOffice.
Source : <https://archello.com/project/cem-kamanar>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur, voûte
- Technique utilisée : BTC (stabilisée au ciment)
- Epaisseur du mur : ~ 32 cm
- Provenance de la terre : Locale

Aucune information précise concernant les fondations n'a été trouvée, mais, sur base des différentes photos disponibles, une hypothèse de fondations en pierre est émise.

Le mur principal forme une **voûte porteuse**, réalisée à l'aide de **BTC** (briques de terre comprimée) **stabilisées avec 8 % de ciment** (DAWOffice, s. d.). La voûte travaille en compression, exploitant ainsi les bonnes propriétés mécaniques de la terre. La **portée** de celle-ci atteint **5,40 mètres**.

La toiture métallique vient se positionner sur les voûtes, sur une structure en bois directement fixée aux façades en BTC, à l'aide d'éléments (dont la matière n'est pas documentée) traversant les murs (cf. figure 113). J'émetts l'hypothèse que ces éléments sont en bois. Elle sert également de protection solaire, permettant, avec l'inertie de la terre et la ventilation naturelle de gérer les surchauffes (Archello, s. d).

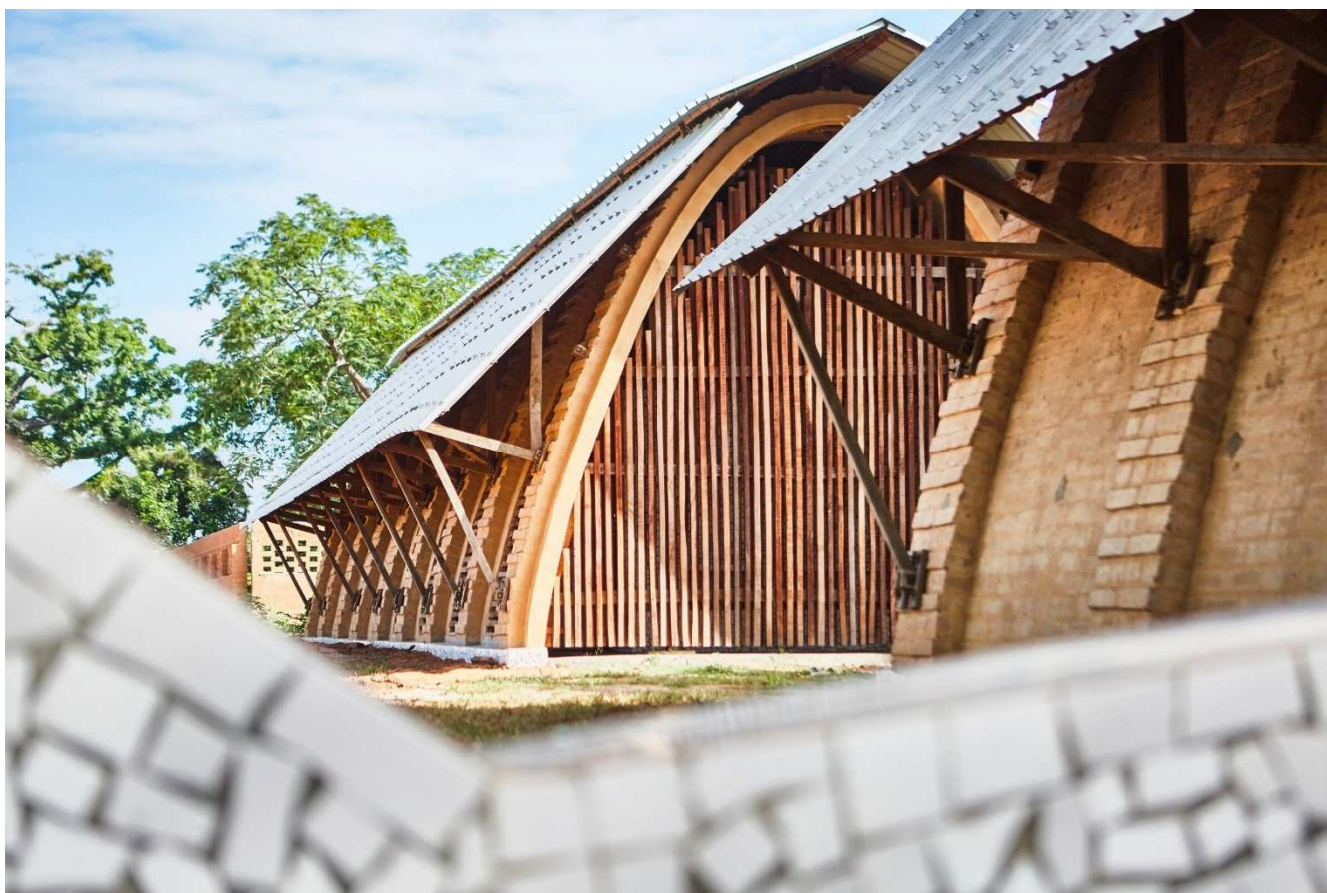


Figure 113 : Photo de la façade du projet CEM Kamanar. © Noemí de la Peña
Source : <https://archello.com/project/cem-kamanar>

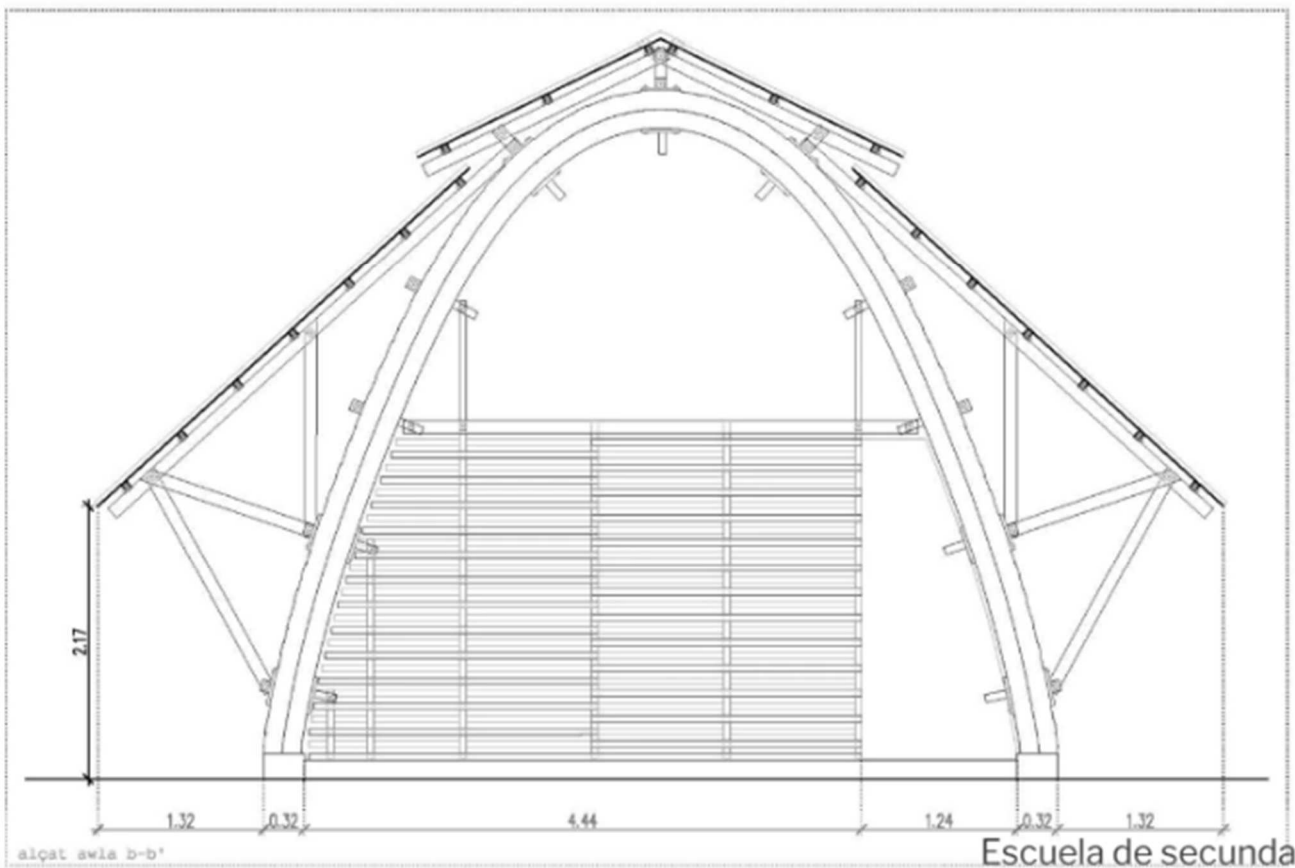
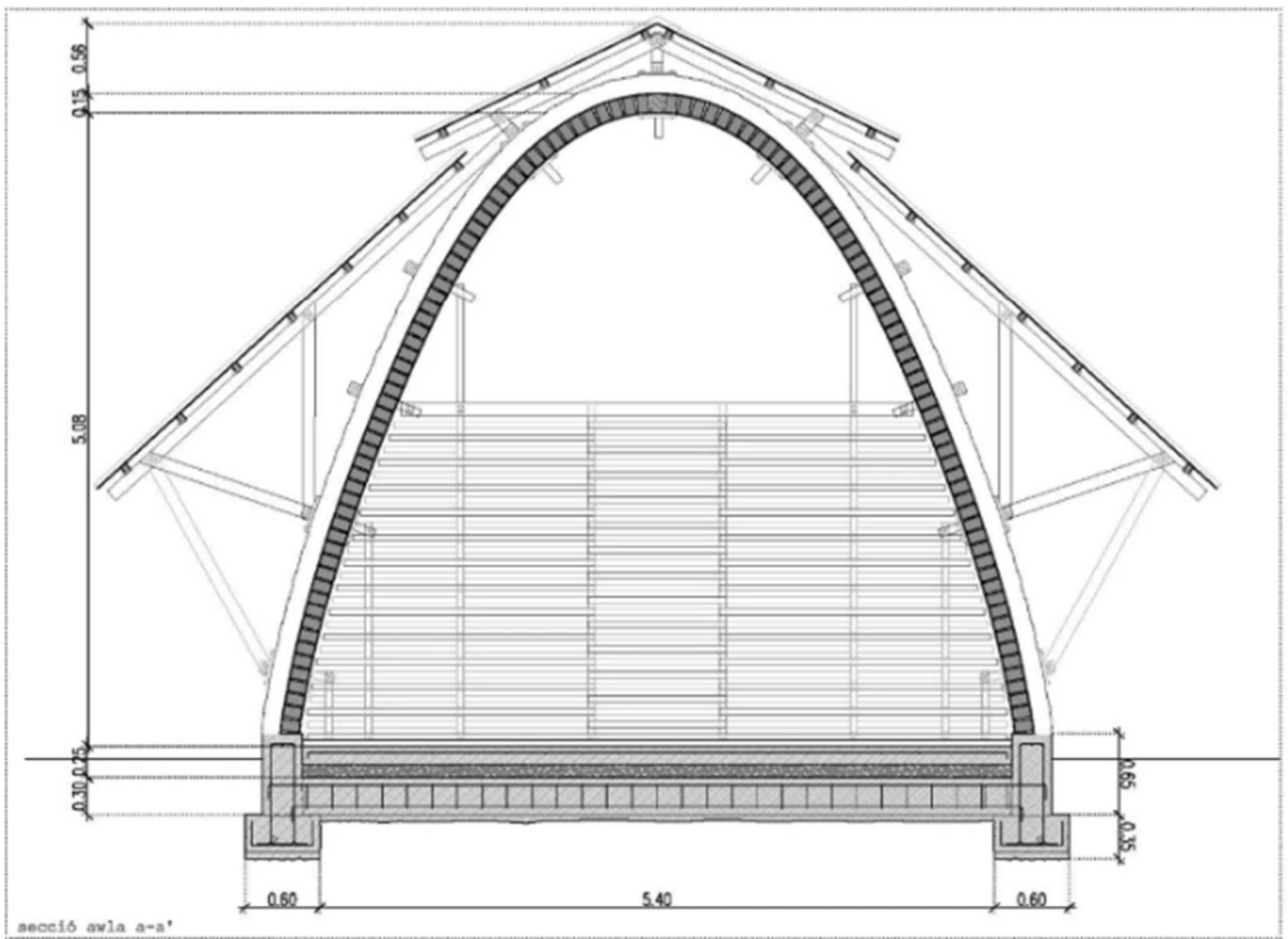


Figure 114 : Détail constructif du projet CEM Kamanar.
 Source : <https://arquitecturaviva.com/works/secondary-school-in-thionck-essyl>

Analyse critique et analytique :

La **réversibilité** du projet est envisageable, mais un **retour à l'état naturel de la terre** n'est pas possible. En effet, les **briques de terre comprimée (BTC)** ont été **stabilisées avec du ciment** (à hauteur de 8 %) afin d'en améliorer les **performances techniques**. Cela limite leur capacité à se désintégrer naturellement. Toutefois, ces BTC peuvent être **réutilisées telles quelles** dans d'autres projets, après un **nettoyage**. Le **bois** utilisé dans le projet peut également être **revalorisé** et **réutilisé**, ce qui contribue à une certaine **circularité** des matériaux.

D'un point de vue analytique, le choix d'utiliser des **BTC stabilisées au ciment** permet de garantir une **durabilité** et une **stabilité structurelle**. Bien que l'ajout de **ciment** puisse sembler en **contradiction** avec les objectifs de **construction durable**, son **utilisation reste limitée** dans ce projet, ce qui atténue son impact environnemental. Par ailleurs, la **terre** étant un matériau **localement abondant**, elle réduit à la fois les **coûts** et **l'empreinte carbone liée au transport**.

Tableau de synthèse des projets en terre crue

	Anna Heringer – Meti Handmade School	Francis Kéré – Gando Primary School	Martin Rauch – The House Rauch	Atelier Régis Rouldil - Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma	DAWOffice - CEM Kamanar
Localité	Rudrapur, Bangladesh	Gando, Burkina Faso	Schlins, Autriche	Paris, France	Thionk Essyl, Sénégal
Climat	Climat tropical	Climat tropical	Climat tempéré	Climat Tempéré	Climat tropical
Date de construction	2007	1998-2001	2005-2008	2022	2021
Superficie	325 m ²	520 m ²	200 m ²	308 m ²	1900 m ²
Composition	1 étage	De plain-pied	2 étages	De plain-pied	De plain-pied
Fonction	Etablissement scolaire	Etablissement scolaire	Résidence privée	Équipement scolaire	Equipement scolaire
Participation locale	Oui	Oui	Aucune information	Non	Oui
Matériau utilisé	Terre, bambou	Terre latéritique	Terre, bois	Terre (non stabilisée), bois	Terre stabilisée au ciment
Provenance du matériau	Local	Local	Local, excavée du site	La terre provient de la briqueterie Dewulf à Allonne dans l'Oise, le bois est d'origine française	Local
Technique de mise en œuvre	Bauge	BTC stabilisé au ciment	Pisé	Pisé	BTC stabilisé au ciment
Réversibilité du projet	Facile à moyenne	Moyenne à difficile	Facile à moyenne	Facile à moyenne	Moyenne
Réutilisation envisager des matériaux	Réutilisation complète	Réutilisation en tant que brique BTC stabilisée	Réutilisation complète	Réutilisation du mélange terre/chaux	Réutilisation en tant que brique BTC stabilisée
Impact écologique	Nul à faible	Faible à moyen	Nul à faible	Faible à moyen	Faible à moyen

Figure 115 : Tableau récapitulatif des projets en terre crue.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

L'étude de **cinq projets en terre crue**, situés au Bangladesh, Burkina Faso, Autriche, France et Sénégal, montre que ce matériau s'adapte aussi bien aux **climats tropicaux** qu'aux **climats tempérés**, à condition de respecter certains principes constructifs. Dans presque tous les cas, des débords de toiture et un soubassement d'environ 30 cm ont été mis en place pour protéger les murs de la pluie. Utilisée principalement pour des **murs porteurs massifs** d'une épaisseur allant de 30 à 50 cm, la terre crue se prête à diverses techniques (bauge, pisé, briques de terre comprimée (BTC)) offrant chacune des caractéristiques spécifiques. La taille des projets varie également, démontrant la **flexibilité** du matériau dans des contextes architecturaux différents, allant de l'habitat individuel à des structures de plus grandes envergures.

La terre employée provient majoritairement du **site de construction**, limitant ainsi l'**impact environnemental**, sauf pour le projet parisien nécessitant un approvisionnement régional. La participation locale a été forte dans les projets africains et asiatiques, favorisant la transmission des savoir-faire, contrairement aux projets européens, marqués par une faible connaissance de ces techniques. Certains projets ont intégré des **adjuvants** comme la chaux (cf. projet 4) ou le ciment (cf. projets 2 et 5) pour renforcer la durabilité face aux intempéries. Toutefois, si la stabilisation améliore la résistance, elle augmente aussi l'impact écologique.

Globalement, la **terre crue non stabilisée** affiche une **empreinte environnementale très faible**, confirmant qu'elle reste aujourd'hui une **solution durable et locale** face aux défis contemporains.

Projets vernaculaires en terre crue

Les immeubles des villes de Sanaa au Yémen

Le Yémen, situé au sud de la péninsule arabique, se caractérise par une grande diversité géographique avec la mer Rouge et le golfe d'Aden (Attia, 2022). Dans ce pays, il y a la vieille ville de Sanaa qui est réputée pour ses hauts immeubles en terre crue de quatre à neuf étages (Abdallah et al., 2020), construits selon la technique du pisé, avec aussi des briques d'adobe (Attia, 2022; Douce Cahute, s. d.-c) et sur une fondation en pierre de basalte (Attia, 2022). Elle se distingue par sa densité urbaine (Attia, 2022) et l'architecture de ses bâtiments, dont les façades sont ornées de motifs en pierre cuite ou en gypse blanc avec un soubassement en pierre (Attia, 2022; Douce Cahute, s. d.-c). La ville se développe verticalement (Attia, 2022) et sa forme permet de tirer parti des meilleures orientations pour avoir autant un confort d'été qu'hiver (Abdallah et al., 2020). En effet, le tour est constituée de plusieurs longueurs ce qui permet en hiver d'augmenter le gain thermique et d'avoir en même temps un confort d'été au vu de la taille des plafonds (Abdallah et al., 2020). L'agencement intérieur continue ce principe en découpant les espaces en espaces primaires et secondaires (Abdallah et al., 2020). Cette ville incarne donc une approche durable en intégrant harmonieusement les dimensions environnementales, sociales et économiques (Attia, 2022).



Figure 116 : Les immeubles des villes de Sanaa au Yémen.

Source : <https://maison-monde.com/maisons-traditionnelles-de-sanaa/>

La ville de Ghadamès en Libye

La ville de Ghadamès, également connue sous le nom de la « Perle du désert » (Borgi, 2012) et inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO (Dunlop, 2022), est un témoignage intéressant de l'architecture en terre crue sous la technique du pisé ou encore de la brique d'adobe (Borgi, 2012). Elle est conçue en harmonie avec son milieu naturel, elle résiste à des chaleurs accablantes et à des vents puissants (Dunlop, 2022). Ces constructions sont connues pour avoir de murs assez épais afin de les garder au frais (Dunlop, 2022).



Figure 117 : La ville de Ghadamès en Libye. © Fiona Dunlop
Source : <https://www.bbc.com/travel/article/20221026-qhadames-is-this-the-perfect-desert-town>

Tableau synthèse des projets vernaculaires en terre crue

Critères	Les immeubles des villes de Sanaa au Yémen	La ville de Ghadamès en Libye
Climat	Climat désertique	Climat désertique
Contexte	Urbain dense, habitat vertical	Habitat groupé, habitat dense
Structure	Immeubles de 4 à 9 étages en terre crue sur fondations en pierre de basalte	Maisons à murs épais et porteur, ruelles couvertes
Matériaux, techniques principales	Pisé, briques d'adobe, pierre basaltique, gypse blanc, pierre cuite	Pisé, briques d'adobe
Système constructif	Superposition de niveaux en terre crue, soubassement en pierre, façades ornementées	Murs massifs en pisé ou adobe, construction compacte et ombragée
Plan intérieur	Séparation fonctionnelle entre espaces primaires et secondaires, optimisation thermique	/
Ventilation & éclairage	Ventilation naturelle par la hauteur, fenêtres orientées, jeux de lumière filtrée	Rues couvertes, patios intérieurs, lumière indirecte, fraîcheur conservée
Adaptation au milieu	Optimisation orientation/forme pour gain solaire et confort thermique, matériaux locaux	Murs épais pour inertie thermique, ruelles ombragées, réponse aux conditions désertiques, résiste aux vents
Caractère éphémère / démontable	Constructions solides et durables dans le temps	Constructions durables, prévues pour le long terme
Durabilité environnementale	Élevée, matériaux locaux, faible énergie grise, gestion des ressources naturelles	Élevée, autonomie environnementale, adaptation climatique, architecture passive, ressources locales

Figure 118 : Tableau synthèse des projets vernaculaire en terre crue.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Ces deux exemples de **constructions en terre crue** montrent comment des **savoir-faire traditionnels** ont permis de créer des formes architecturales **résilientes** et **adaptées à leur milieu**. Tant à Sanaa qu'à Ghadamès, l'emploi de matériaux locaux, la gestion fine de l'inertie thermique, et une organisation spatiale contextuelle démontrent la pertinence d'une architecture vernaculaire pensée pour durer, tout en étant en symbiose avec le climat et la culture locale.

Ces modèles offrent des **enseignements précieux** pour l'**architecture contemporaine**, en révélant les possibilités qu'offrent des **pratiques ancrées dans leur contexte**. Ils illustrent comment l'**adéquation entre habitat, climat et ressources locales** peut générer des solutions à la fois **efficaces** et **durables**.

Les projets présentés précédemment ont permis de redécouvrir le **potentiel de la terre crue** comme matériau de construction. Utilisée avec **ingéniosité** dans les architectures vernaculaires, elle inspire aujourd'hui une nouvelle génération d'architectes soucieux de **réconcilier modernité et savoir-faire anciens**. En la réemployant, ils ne se contentent pas d'imiter, mais **réinterprètent** ces pratiques avec une approche **écologique** et **adaptée aux enjeux actuels**.

Chapitre 3 :

Construire avec la
pierre massive



Introduction

L'exploration d'autres projets était initialement prévue dans ce chapitre. Néanmoins, le manque de temps et l'accès restreint aux informations et aux architectes ont rendu cette analyse plus difficile. Voici une liste de projets qui auraient également pu être étudiés :

- onSITE architecture et designbuildLAB, LabEx AE&CC, Ensa Grenoble - Restaurant scolaire Jean-Rostand
- Carles Oliver, Xim Moyá - Résidence de 6 logements sociaux
- Christophe Aubertin et Aurélie Husson, Collectif Studiolada - Marché couvert
- Moa Architecture - 3 maisons en pierres massives

Immeuble mixte 1600m²

L'atelier architecture Perraudin

- Localisation : Caluire-et-Cuire, France (Europe)
- Climat : Climat tempéré
- Fonction : Immeuble mixte
- Surface totale : 1600 m²
- Composition : 4 étages
- Matériau principal : Pierre naturelle
- Année de construction : Aucune information

Contexte et Enjeux :

Dans un contexte de transition écologique et de redéfinition des pratiques constructives, l'immeuble mixte situé à Caluire-et-Cuire incarne une réponse contemporaine aux enjeux environnementaux. Conçu par l'agence Perraudin Architectes, ce projet s'inscrit dans une volonté de renouer avec des matériaux bruts et durables, tout en s'adaptant aux besoins d'un programme mixte combinant logements et bureaux. L'immeuble, positionnée près des bords du Rhône et s'inscrit dans un contexte urbain dense (Chroniques D'Architecture, 2021).



Figure 119 : Plan de masse du projet Immeuble mixte signé Gilles Perraudin.
Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/immeuble-mixte/>



Figure 120 : Photo des coursives Immeuble mixte en pierre massive à Caluire. ©11h45
Source : <https://chroniques-architecture.com/immeuble-mixte-pierre-massive-caluire-perraudin/>



Figure 121 : Photo de l'arrière de l'immeuble mixte.
Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/immeuble-mixte/>

Approche Écologique :

L'usage de la pierre massive permet de réduire significativement l'empreinte carbone du bâtiment en limitant l'utilisation du béton (L'atelier Architecture Perraudin, s. d.-b). Il convient toutefois de souligner que, bien que le projet soit implanté en France, les pierres ont été extraites en Espagne, impliquant ainsi un transport interrégional, vraisemblablement par voie routière, avec un impact environnemental non négligeable à prendre en compte dans l'analyse globale du cycle de vie.

Fonctionnalité et Confort :

La conception de l'immeuble à Caluire-et-Cuire vise un équilibre entre rationalité fonctionnelle et qualité d'usage. Les volumes sont pensés pour offrir une grande flexibilité d'usage, avec une trame structurale régulière qui peut permettre une évolutivité des espaces. Un immeuble mixte mêlant plusieurs commerces et types d'habitations (simplex et duplex) pour créer un endroit agréable pour les étudiants (L'atelier Architecture Perraudin, s. d.-b).



Figure 122 : Photo du projet de l'immeuble mixte signé Gilles Perraudin. ©11h45
Source : Chroniques d'architecture. (2021) <https://chroniques-architecture.com/immeuble-mixte-pierre-massive-caluire-perraudin/>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur, voûte porteuse
- Epaisseur de la pierre : ~ 50 cm
- Type de pierre : Pierre Rosal et Pierre d'Albamiel (site d'extraction)

Le projet repose sur des fondations supposées en béton, assurant la stabilité de l'ensemble. Au-dessus, le rez-de-chaussée et le premier étage sont structurés par des **voûtes** en pierre massive, réalisées à partir de **pierres prétaillées** en amont du chantier. Celles-ci sont assemblées sur chantier grâce à un **joint de chaux**, avec l'aide d'une grue pour leur mise en place (cf. figure 124). La structure suit une **trame** régulière de **2,3 mètres**, facilitant l'organisation constructive (Chroniques D'Architecture, 2021). Les **portées** atteignent jusqu'à **5 mètres**.

Les planchers, initialement prévus en bois massif, ont finalement été réalisés en béton (Chroniques D'Architecture, 2021).

La toiture est construite en **bois de mélèze**, contrastant avec la minéralité des étages inférieurs. Cette transition traduit une stratégie constructive hybride, associant la massivité de la pierre à la légèreté du bois pour le dernier niveau.

Enfin, la façade est entièrement réalisée en pierre massive d'origine espagnole, combinant deux types de pierre: la Rosal, plus dure, pour les parties structurelles, et l'Albamiel, plus tendre, pour améliorer le confort intérieur (Chroniques D'Architecture, 2021).

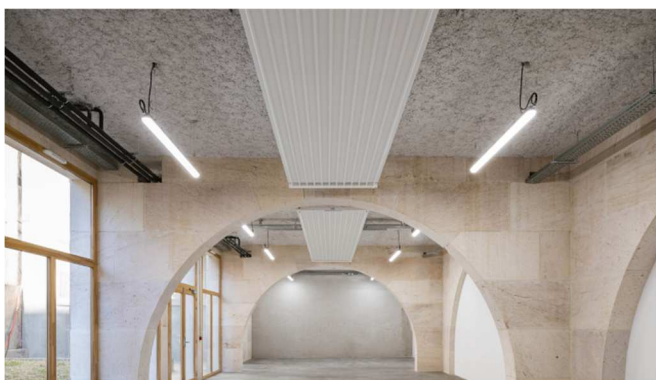


Figure 123 : Voûte en pierre massive.
Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/immeuble-mixte/>

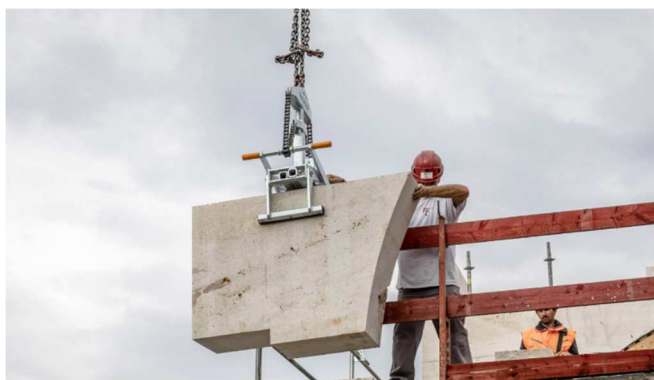


Figure 124 : Blocs de pierre taillée.
Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/immeuble-mixte/>

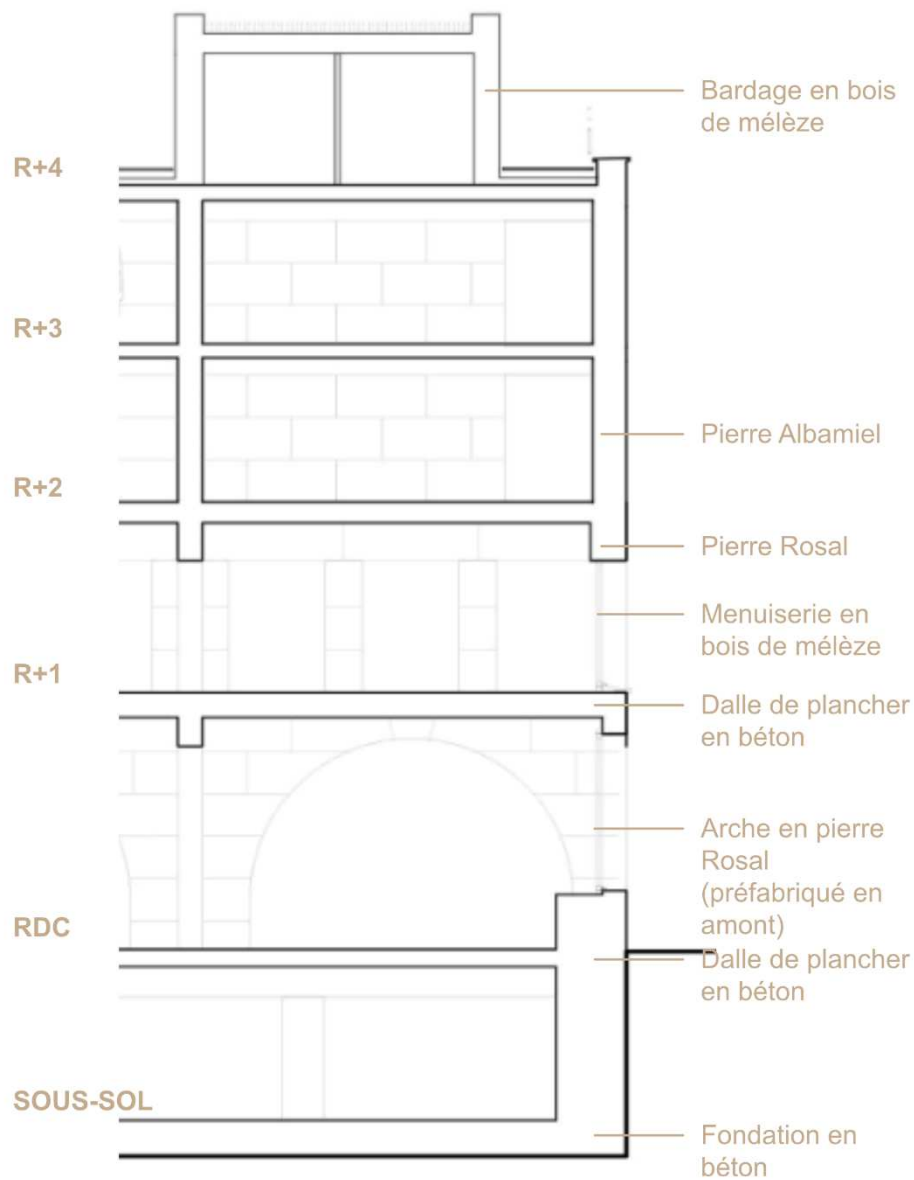


Figure 125 : Coupe longitudinale du projet de l'immeuble mixte signé Gilles Perraudin. © AAP
 Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/immeuble-mixte/>

Analyse critique et analytique :

La **réversibilité** du projet est **envisageable**, mais l'utilisation de la **Pierre massive** pose à la fois des avantages et des limites. Ce matériau assure une **grande durabilité** et offre, dans certains cas, une **possibilité de réutilisation**. Toutefois, les **voûtes du rez-de-chaussée et du premier étage**, rend le **réemploi plus complexe** étant donné que celles-ci sont composées de **pierres prétaillées** à des formes pour leur usage dans le projet. Le reste des **pierres taillées**, non intégrées dans des structures aussi contraignantes, pourrait être **réutilisé**, à condition d'être **nettoyé**.

D'un point de vue analytique, le choix de la **Pierre Rosal et Albamiel**, extraites en **Espagne**, soulève une problématique écologique. Bien que la **Pierre massive** soit un matériau naturellement **durable** et à **faible empreinte carbone**, le **transport** (probablement par voie routière) compromet en partie ses avantages écologiques. Par ailleurs, la **volonté initiale** des concepteurs était de **limiter l'usage du béton**, notamment pour les **planchers**, prévus à l'origine en **bois massif**. Finalement, ces éléments ont été réalisés en **béton**, ce qui **modifie l'approche écologique** du projet et **augmente considérablement l'empreinte carbone** de la construction.

68 logements collectifs en pierre massive 15 500m²

Gilles Perraudin & l'Atelier Archiplein

- Localisation : Plan-les-Ouates, Suisse (Europe)
- Climat : Climat tempéré
- Fonction : 68 logements collectifs, fonction mixte
- Surface totale : 15 500 m²
- Composition : 7 étages
- Matériau principal : Pierre naturelle
- Année de construction : 2021

Contexte et Enjeux :

Ce projet se compose de deux immeubles de logements collectifs intégrant des espaces commerciaux en rez-de-chaussée (L'atelier Architecture Perraudin, s. d.-a). L'un des principaux défis a été de démontrer qu'il est possible de réaliser un ensemble de grande envergure en utilisant de la pierre massive mélangée à du bois en réactivant des modes de construction traditionnels (L'atelier Architecture Perraudin, s. d.-a).



Figure 126 : Plan de situation du projet 68 logements collectifs en pierre massive.
Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/logements-suisse/>



Figure 127 : Photo de l'intérieur d'un appartement. ©Leo Fabrizio
 Source : <https://divisare.com/projects/465690-atelier-archiplein-qilles-perraudin-adrien-buchet-leo-fabrizio-solid-stone>

Approche Écologique :

L'utilisation de la pierre massive en tant que matériau de structure, en alternative au béton (L'atelier Architecture Perraudin, s. d-a), permet de réduire l'empreinte environnementale du projet en limitant le recours à des matériaux plus émissifs et énergivores. De plus, les pierres ont été extraites dans les carrières de Provence mais aussi chez Francepierre (Leroux, 2019). La pierre Suisse a été pensée mais pas retenue pour une raison de coût et de transport (Leroux, 2019).

Fonctionnalité et Confort :

Les logements sont conçus pour optimiser le bien-être des habitants grâce à une conception spacieuse, une luminosité naturelle abondante et une ventilation efficace. La pierre massive offre les performances thermiques et acoustiques de qualité, améliorant ainsi le confort des espaces de vie. L'intégration d'espaces commerciaux en rez-de-chaussée contribue à dynamiser le quartier et à favoriser une mixité des usages.

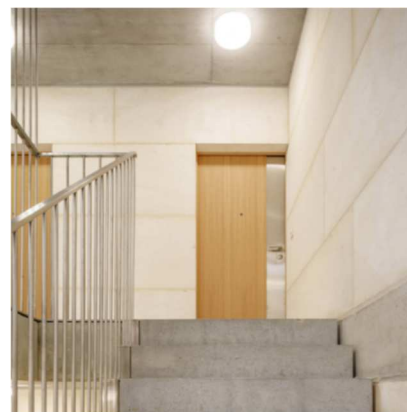


Figure 128 : les escaliers du projet 68 logements collectifs en pierre massive.
 Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/logements-suisse/>



Figure 129 : Projet 68 logements collectifs en pierre massive. © Leo Fabrizio
 Source : <https://divisare.com/projects/465690-atelier-archiplein-qilles-perraudin-adrien-buchet-leo-fabrizio-solid-stone>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur - Epaisseur de la pierre : ~ 50 cm
- Type de pierre : Pierre de Migné et pierre de Brétigny et d'Estailade (site d'extraction)

Le projet repose sur des fondations dont la nature précise n'est pas documentée. Toutefois, il est fortement probable que les fondations soient en béton.

La structure portante de ce projet est en **Pierre massive** directement taillées dans les carrières (Leroux, 2019). Pour la partie basse, des blocs de pierre de Migné d'une **épaisseur de 50 cm** ont été utilisés. Les parties intérieures ainsi que les étages sont construits avec des pierres de Brétigny et d'Estailade, plus douces (Chroniques D'Architecture, 2021-a). Les pierres sont assemblées à l'aide d'un joint dont la composition (ciment ou mortier) n'est pas précisée. Ce projet est constitué de 10 000 blocs (Divisare, s. d.-c) et leurs dimensions varient entre 142 et 150 cm de longueur, avec une hauteur de 73 cm, et l'épaisseur est estimée à 50 cm.

Ne disposant que de l'information selon laquelle le bâtiment n'a pas eu recours au béton pour les structures porteuses (Divisare, s. d.-c) et en tenant compte des intentions exprimées par les architectes dans d'autres projets similaires, j'émet l'hypothèse que les dalles de plancher ont été réalisées en structure bois.

Un plan de calepinage a été effectué pour suivre une logique d'assemblage du mur du projet. Il révèle une multitude de blocs de pierre taillés en amont, dont le **prédimensionnement** et la **précision de coupe** garantissent une mise en œuvre soignée et un ajustement optimal sur chantier. Sur le chantier sont disposées les pierres avec un code noté dessus (cf. figure 131).

La toiture n'est pas explicitement décrite, mais au vu du système constructif général, il est vraisemblable qu'elle repose également sur une charpente bois.

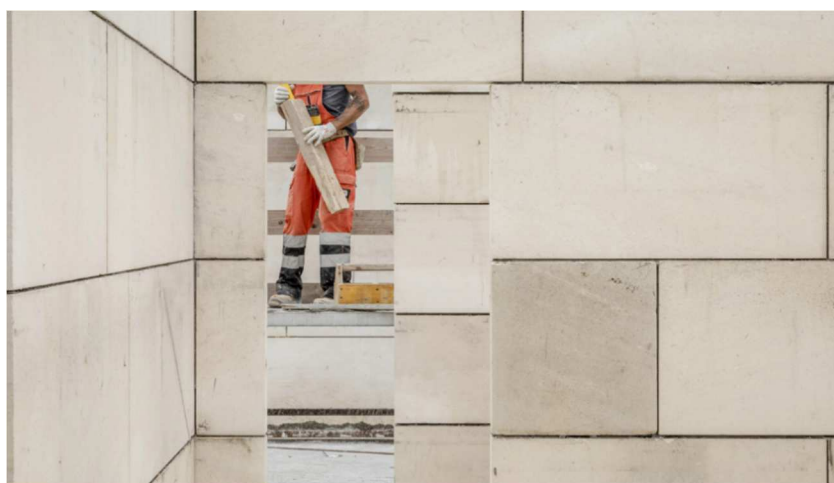


Figure 130 : Vue prise pendant le chantier du projet.
Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/logements-suisse/>

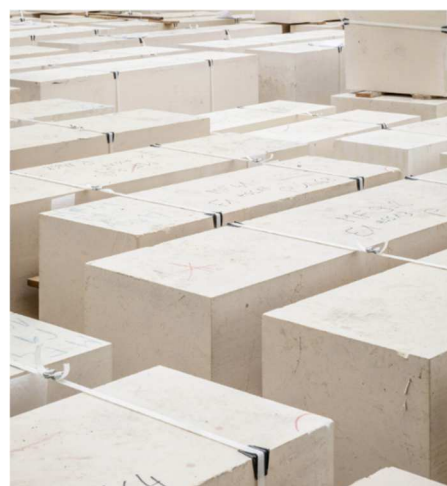


Figure 131 : Blocs taillés et numérotés.
Source : <https://atelierperraudin.com/travaux/logements-suisse/>

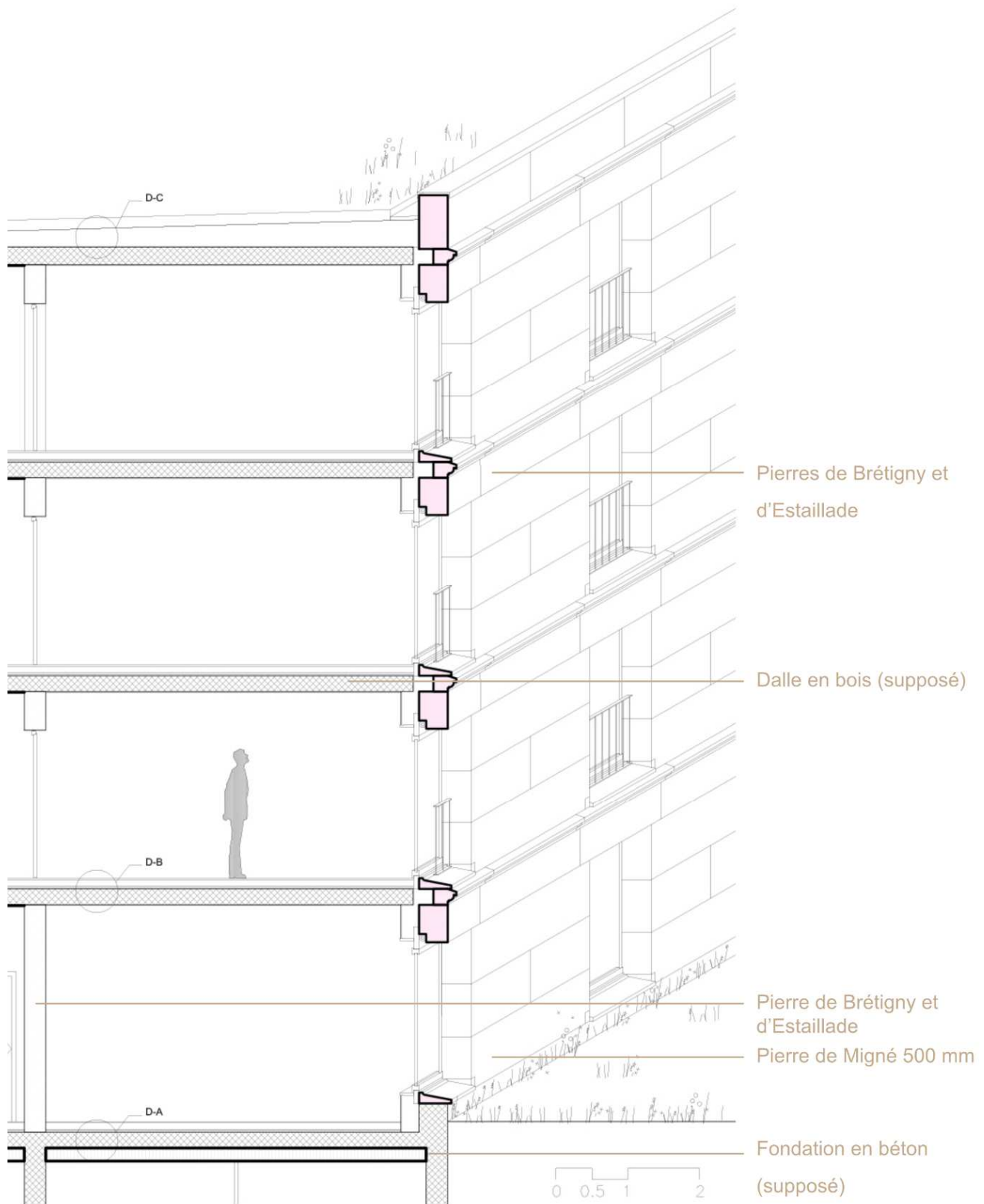


Figure 132 : Coupe longitudinale du projet 68 logements collectifs en pierre massive. © Atelier Archiplein
 Source : <https://divisare.com/projects/465690-atelier-archiplein-gilles-perraudin-adrien-buchet-leo-fabrizio-solid-stone>

Analyse critique et analytique :

La **réversibilité du projet** reste **envisageable**, bien que partiellement limitée. La **Pierre massive**, reconnue pour sa **durabilité**, est assemblée à l'aide de joints dont la composition exacte (ciment ou mortier) n'est pas précisée. Cela implique un **nettoyage préalable** pour permettre une éventuelle **réutilisation**. Certaines pierres, ayant été **taillées sur mesure**, présentent une **réemployabilité restreinte** dans d'autres contextes. En revanche, les **pierres aux formats standards, non liées par des éléments mécaniques** et uniquement assemblées par un joint non identifié, pourraient être **réemployées plus facilement**, après un nettoyage adéquat.

D'un point de vue analytique, il est intéressant de noter que l'option de la **Pierre suisse** a été envisagée initialement, mais son **coût élevé** a conduit à privilégier des pierres issues des carrières de Provence et de l'entreprise Francepierre. Le choix de **blocs taillés directement en carrière**, associés à un **calepinage soigné**, s'inscrit dans une approche traditionnelle mais efficace en matière de **stabilité structurelle et esthétique**. Cependant, l'absence de précisions sur la nature des joints demeure un point d'incertitude, notamment concernant l'impact que peut avoir le joint. Enfin, l'intégration de **dalles de plancher en bois lamellé-croisé (CLT)** constitue un choix pertinent. Ce matériau allie **durabilité, légèreté** et **faible impact écologique**, en comparaison avec des dalles en béton, renforçant ainsi l'engagement environnemental du projet.

Projet Coulouvrenière

Atelier Archiplein/ FDMP réalisation

- Localisation : Genève, Suisse (Europe)
- Climat : Climat tempéré
- Fonction : Immeuble de 10 logements
- Surface totale : 1100 m²
- Composition : 3 étages
- Matériau principal : Pierre naturelle, bois
- Année de construction : 2023

Contexte et Enjeux :

Proche de la rive du Rhône, implanté à Genève, sur la rue de la Coulouvrenière, dans un contexte urbain dense composant avec d'anciens bâtiments industriels et un bâtiment classé, se dresse un immeuble de 10 logements sociaux (Archello, 2023).



Figure 133 : Plan d'implantation du projet Coulouvrenière.

Source : <https://archello.com/fr/news/atelier-archiplein-realise-un-immeuble-de-logements-sociaux-en-pierre-massive-a-geneve>



Figure 2 : Projet Coulouvrenière de L'Atelier Archiplein. @Leo Fabrizio
 Source : <https://archello.com/fr/news/atelier-archiplein-realise-un-immeuble-de-logements-sociaux-en-pierre-massive-a-geneve>

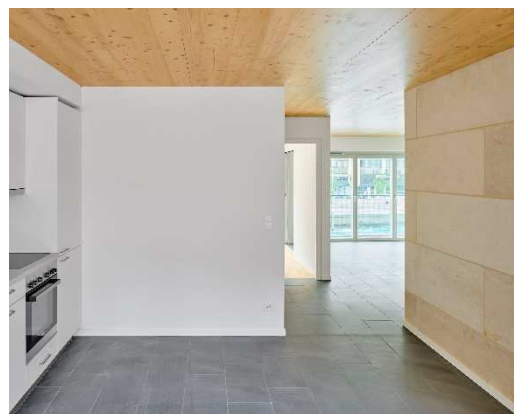


Figure 135 : L'intérieur d'un appartement du projet Coulouvrenière de L'Atelier Archiplein.
 Source : <https://archello.com/fr/news/atelier-archiplein-realise-un-immeuble-de-logements-sociaux-en-pierre-massive-a-geneve>

Approche Écologique :

Le projet utilise la pierre massive comme matériau et s'inscrit dans une démarche de réduction de l'empreinte carbone et environnementale du bâtiment. Ce mode constructif ancestral est ainsi remis au goût du jour (Atelier Archiplein, communication personnelle, 11 mars 2025). Le projet mêle l'usage du bois et de la pierre (Atelier Archiplein, communication personnelle, 11 mars 2025).

Fonctionnalité et Confort :

L'immeuble de logement s'élève sur trois niveaux de logements. L'organisation intérieure est pensée pour maximiser l'habitabilité et la qualité de vie des occupants sous un plan libre (Atelier Archiplein, communication personnelle, 11 mars 2025). L'agencement des espaces privilégie la lumière naturelle, grâce à de larges ouvertures qui favorisent un éclairage optimal tout en offrant à chaque appartement, un balcon extérieur (Atelier Archiplein, communication personnelle, 11 mars 2025).



Figure 136 : Projet Coulouvrenière de L'Atelier Archiplein au bord du Rhône. @Leo Fabrizio
 Source : <https://archello.com/fr/news/atelier-archiplein-realise-un-immeuble-de-logements-sociaux-en-pierre-massive-a-geneve>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur
- Type de pierre : Pierre de Sireuil et Pierre de Chauvigny
- Epaisseur de la pierre : ~ 25 et 30 cm

Le projet repose sur des fondations dont la nature précise n'est pas détaillée. Toutefois, le recours ponctuel au béton, notamment pour l'escalier, laisse supposer que les fondations ont pu intégrer du béton armé.

La structure du rez-de-chaussée et des étages est constituée de **murs porteurs en pierre massive**. Deux types de calcaire sont employés : la pierre de Sireuil, robuste et marquée par des strates sédimentaires, est utilisée en façade extérieure avec une **épaisseur de 30 cm** ; la pierre de Chauvigny, réputée pour sa résistance à la compression, est réservée aux structures intérieures, avec **une épaisseur de 25 cm** (Didelon, 2023). L'association de ces deux pierres permet d'exploiter au mieux leurs propriétés respectives en fonction des besoins spécifiques du bâtiment (Atelier Archiplein, communication personnelle, 11 mars 2025). Les blocs de pierre sont percés et assemblés mécaniquement (cf. figure 138), en complément d'un joint en mortier de chaux, ce qui améliore la stabilité mais complique leur potentiel réemploi (Chroniques d'architecture, 2024).

À partir des détails techniques, on comprend que les dalles de plancher sont réalisées en **CLT** (bois lamellé-croisé) (Atelier Archiplein, communication personnelle, 11 mars 2025) issu de forêts suisses (Didelon, 2023). Ces dalles sont complétées par une couche d'isolant, une chape, puis un revêtement de finition en carrelage. L'escalier constitue le seul élément de la structure exécuté en béton armé (Chroniques d'architecture, 2024).

La toiture n'est pas explicitement décrite, mais l'usage du CLT pour les planchers suggère une continuité possible en toiture.



Figure 137 : Vues prises pendant le chantier du projet Coulouvrenière. © Leo Fabrizio
Source : <https://archello.com/fr/news/atelier-archiplein-realise-un-immeuble-de-logements-sociaux-en-pierre-massive-a-geneve>

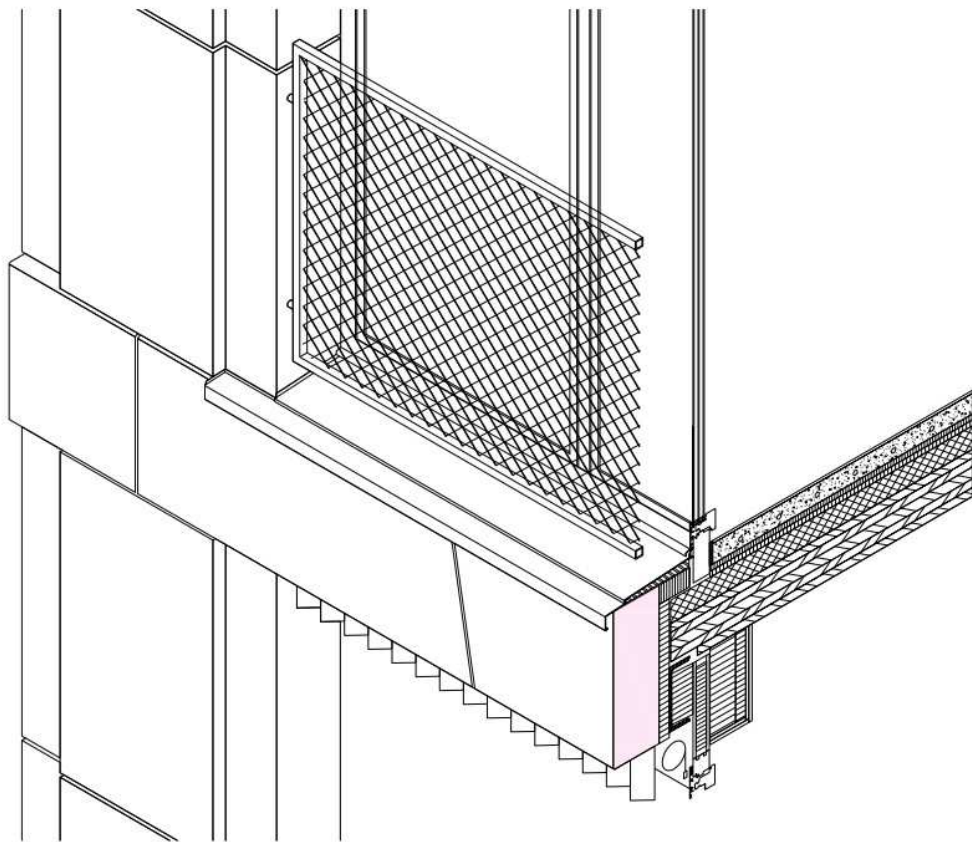
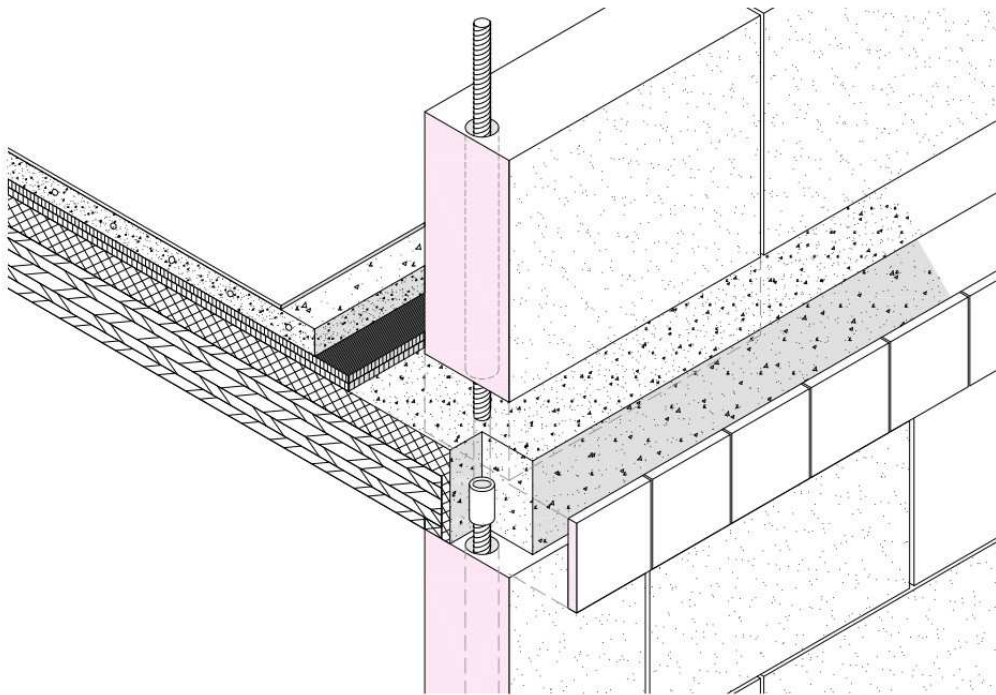


Figure 138 : Détails constructifs du projet Coulouvrenière.
Source : Atelier Archiplein. (2025, 11 mars). Dossier de presse – Projet Coulouvrenière. Document transmis personnellement.

Analyse critique et analytique :

La **réutilisation des matériaux** dans ce projet s'avère **complexe**, notamment en raison de l'**assemblage des pierres** à l'aide de **joints mécaniques** et de **mortier de chaux**. Bien que ces matériaux soient **très durables**, leur **réutilisation** peut s'avérer difficile, en particulier pour les pierres fixées mécaniquement. Les **joints en chaux** nécessitent un **nettoyage** pour permettre une remise à neuf et un éventuel **réemploi** des blocs.

D'un point de vue analytique, le projet fait appel à **deux types de pierres**, choisies pour leurs **qualités spécifiques**. Celles-ci proviennent de **carrières françaises**, ce qui implique un **transport** jusqu'au site. L'**assemblage** par **mortier de chaux** et **éléments mécaniques**, bien que **pertinent pour la stabilité** et la **mise en œuvre**, limite fortement la **possibilité de réutilisation** des pierres en fin de cycle de vie surtout pour les pierres ayant eu une fixation mécanique. Ce choix technique, s'il est justifié sur le plan **structurel**, s'oppose à une **logique de circularité** des matériaux. En revanche, l'utilisation de **dalles de plancher en CLT** (*bois lamellé-croisé*) représente un **choix judicieux**. Ce matériau permet de **réduire l'usage du béton**, tout en **diminuant l'empreinte écologique** du projet. De plus, le CLT utilisé est issu de **forêts locales**, renforçant l'ancrage territorial du projet. À noter que seul l'**escalier** a nécessité le recours au **béton**, ce qui reste **limité** dans l'ensemble.

Groupe scolaire à Opio

Teissier Portal (mandataire), Architecture Environnement (associé)

- Localisation : Opio, France (Europe)
- Climat : Climat tempéré
- Fonction : Equipement scolaire
- Surface totale : 2793 m²
- Composition : 1 étage
- Matériau principal : Pierre naturelle, bois
- Année de construction : 2018

Contexte et Enjeux :

Ce projet est constitué de plusieurs salles de classe dont 4 classes maternelles, 4 classes élémentaires, restauration, plateaux sportifs, ALSH et une bibliothèque (Architecture Environnement, s. d.). Il y avait plusieurs enjeux sur ce site dont la topographie et deux chênes remarquables à conserver (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025). Il a également fallu construire avec un bâtiment existant et occupé durant le chantier. L'ancienne école est conservée et transformée en Accueil de Loisirs Sans Hébergement (ALSH) et reliée avec la nouvelle construction grâce à une passerelle (Architecture Environnement, s. d.).

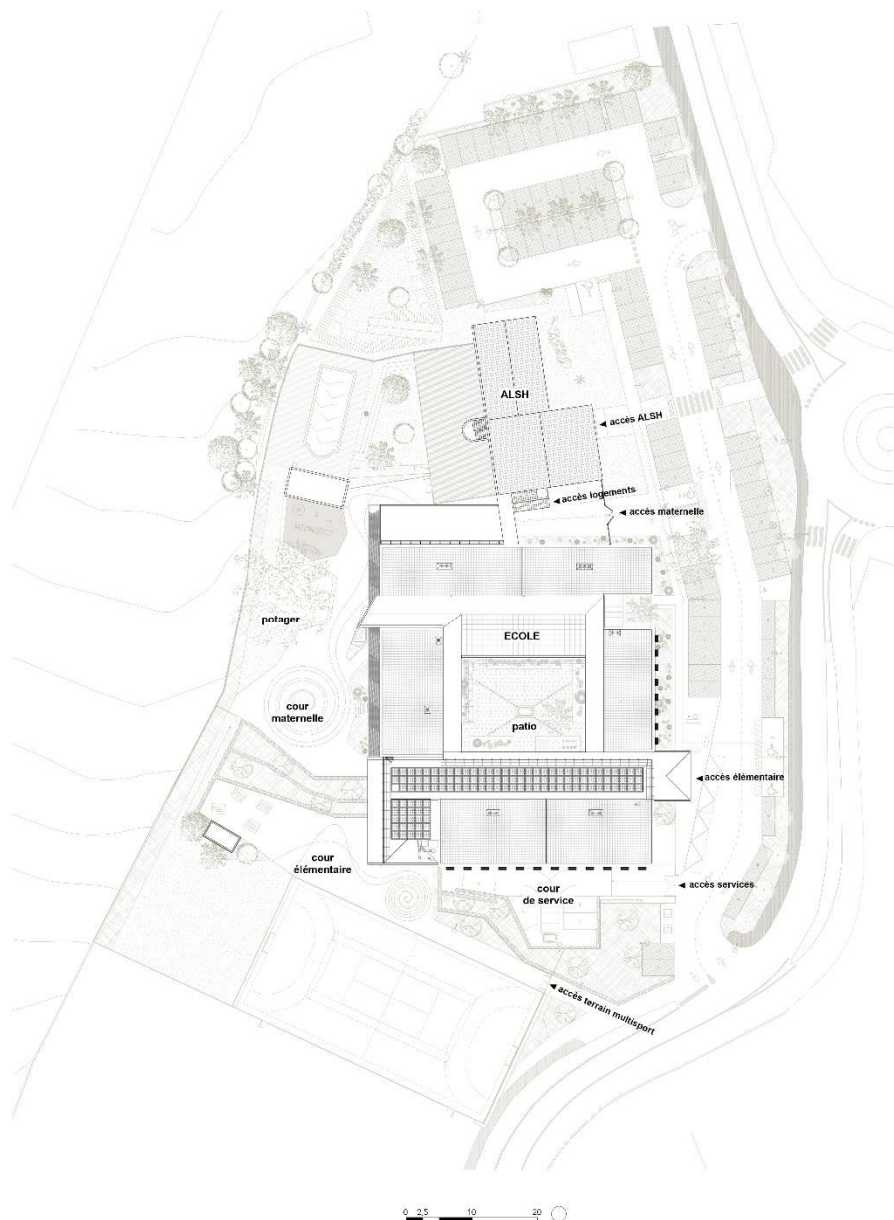


Figure 139 : Plan d'implantation du projet du Groupe scolaire à Opio de Teissier Portal.
Source : Teissier Portal. (2025, 10 mars). Dossier de presse – Groupe scolaire à Opio. Document transmis personnellement.



Figure 140 : Groupe scolaire à Opio de Teissier Portal. © Milène Servelle
 Source : <https://teissierportal.com/projets/groupe-scolaire-2/>



Figure 141 : La cour maternelle du projet. © Milène Servelle
 Source : Teissier Portal. (2025, 10 mars). Dossier de presse – Groupe scolaire à Opio. Document transmis personnellement.

Approche Écologique :

Ce projet a été pensé dans une perspective durable, avec pour ambition d'optimiser chaque aspect de sa conception en priorisant la simplicité et l'efficacité (Architecture Environnement, s. d.). Il met en avant des matériaux renouvelables et biosourcés en utilisant la pierre extraite des carrières de Provence et le bois des Alpes du Sud (Architecture Environnement, s. d.), tandis que l'isolation est assurée par du textile recyclé (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025). De plus, l'utilisation de la pierre massive permet de valoriser le patrimoine du lieu.

Fonctionnalité et Confort :

Le projet a été dessiné pour optimiser la ventilation et l'apport de lumière en créant des espaces traversants. Les brise-soleils sont fixes sur la façade Sud, tandis que ceux des façades Est et Ouest sont orientables (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025). Les enseignants peuvent ainsi ajuster l'inclinaison des lames selon les besoins d'ensoleillement (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025). L'utilisation de la pierre comme matériau de façade permet d'obtenir une bonne inertie thermique (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025).



Figure 142 : Groupe scolaire à Opio.
 Source : <https://teissierportal.com/projets/groupe-scolaire-2/>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur
- Epaisseur de la pierre : ~ 30 et 50 cm
- Type de pierre : Pierre extraite des carrières de Provence

Aucune information précise n'est donnée concernant la nature des fondations, mais on peut supposer qu'elles sont réalisées en béton, bien que cela ne soit pas confirmé.

Les murs porteurs ainsi que la façade sont construits en blocs de pierre massive autoporteurs (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025). Les blocs, d'une épaisseur variant entre 35 et 50 cm, sont soigneusement taillés, numérotés, puis assemblés selon un calepinage (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025). Ce procédé présente plusieurs avantages : il permet d'optimiser la matière en réduisant les pertes lors de la découpe, facilite le montage sur chantier et autorise l'intégration discrète de chaînages en béton armé là où cela est nécessaire. Ces chaînages (bien que non documentés de manière précise) sont supposés être insérés à des endroits stratégiques comme les angles ou les jonctions entre murs et planchers. Ils répondent aux exigences parasismiques en renforçant la cohésion de la structure (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025). En effet, bien que la pierre soit un matériau robuste et durable, elle reste sensible aux vibrations en cas de séisme si elle n'est pas correctement stabilisée. Les chaînages en béton jouent alors le rôle d'un squelette interne, solidarissant l'ensemble du bâti pour éviter les effondrements. Aucun détail supplémentaire n'est fourni concernant les types de joints éventuellement utilisés entre les blocs.

Concernant les planchers, aucune description explicite n'est disponible. Toutefois, au regard de la démarche écologique du projet, on peut raisonnablement supposer qu'ils sont réalisés en bois, en cohérence avec le choix de matériaux biosourcés mis en avant par l'architecte.

Enfin, la toiture est composée d'une charpente en bois français laissée apparente, sur laquelle repose une couverture traditionnelle en tuiles (Teissier Portal, communication personnelle, 10 mars 2025).



Figure 143 : Projet du Groupe scolaire à Opio en construction.
Source : <http://www.arch-environnement.fr/portfolio/items/groupe-scolaire-a-opio/>

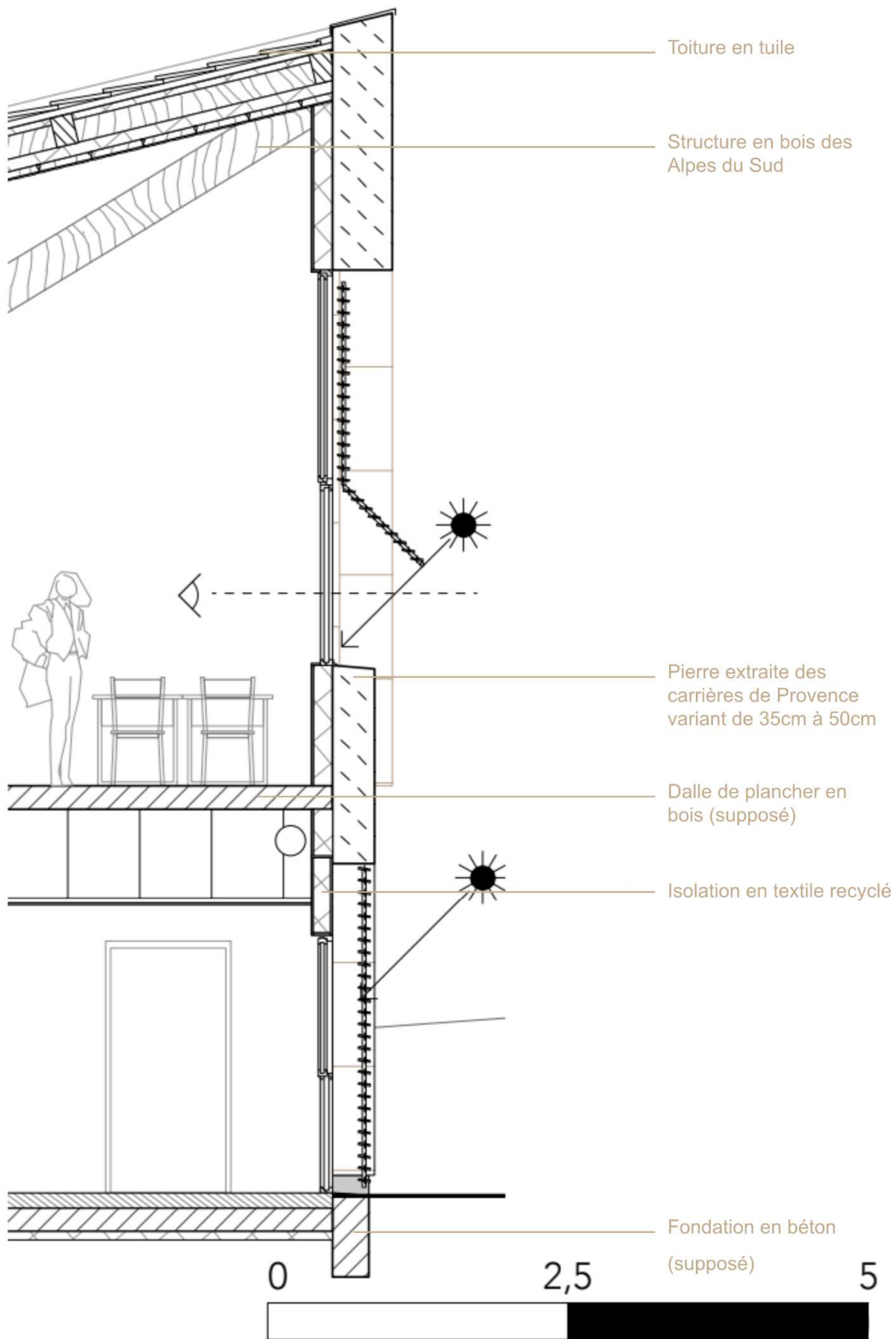


Figure 144 : Coupe longitudinale du projet du Groupe scolaire à Opio.
 Source : Tessier Portal. (2025, 10 mars). Dossier de presse – Groupe scolaire à Opio. Document transmis personnellement.

Analyse critique et analytique :

Le projet présente un certain **potentiel de réversibilité**. Les blocs de **Pierre massive**, lorsqu'ils sont **posés à sec** et sans liant, peuvent être **démontés** et **réemployés**. Cependant, l'intégration de **chaînages en béton**, indispensables pour répondre aux **exigences parasismiques**, limite cette démontabilité. Les **pierres contenant du béton armé** ne sont en effet ni démontables ni réutilisables. Le manque d'information sur la proportion exacte de béton empêche une évaluation précise, mais il est clair que seules les pierres **non solidarisiées par le béton** conservent un **potentiel de réemploi** (sous réserve également du **type de joint** utilisé). Par ailleurs, l'utilisation du **bois** (présumée pour les planchers et confirmée pour la toiture) s'inscrit dans une **logique biosourcée** cohérente avec l'intention initiale du projet et rentre totalement dans un usage de **réversibilité** et **circULARITÉ**.

D'un point de vue analytique, le recours à une **Pierre locale** issue des **carrières de Provence** est un choix judicieux en termes de **durabilité** et d'**impact environnemental**. Ce matériau **robuste** et **intemporel** offre une excellente **inertie thermique**. Enfin, bien que l'ajout de **béton** compromette la **circULARITÉ** de certains éléments, il répond à une **contrainte technique incontournable** liée à la **sécurité sismique**, et n'a pas été introduit par **choix**, mais par **nécessité réglementaire**.

Le chai Delas,Tain l'hermitage

Carl Fredrik Svenstedt Architectes

- Localisation : Tain L'Hermitage, France (Europe)
- Climat : Climat tempéré
- Fonction : Cave viticole et espace de dégustation
- Surface totale : 3836 m²
- Composition : 2 étages
- Matériau principal : Pierre
- Année de construction : 2019

Contexte et Enjeux :

Ce projet s'inscrit dans une région viticole située à Tain L'Hermitage (ArchDaily, 2020-b). L'objectif du projet était de moderniser un site existant tout en conservant un lien fort avec l'histoire et le savoir-faire viticole de la vallée du Rhône (ArchDaily, 2020-b). L'architecte a ainsi conçu un bâtiment qui allie innovation et tradition, en exploitant les qualités naturelles des matériaux pour optimiser le stockage du vin (Carl Fredrik Svenstedt Architect, s. d.).



Figure 145 : Plan de situation du projet Le chai Delas,Tain l'hermitage.

Source : <https://www.archdaily.com/933696/delas-freres-winery-carl-fredrik-svenstedt-architecte>



Figure 146 : Projet Le chai Delas, Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt, vue de l'intérieur. © Dan Glasser
Source : <https://www.carlfredriksvenstedt.com/what/delas/>



Figure 147 : Projet Le chai Delas, Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt, vue du toit. © Dan Glasser
Source : <https://www.carlfredriksvenstedt.com/what/delas/>

Approche Écologique :

La pierre massive est le matériau principal de la construction ce qui en fait un choix particulièrement durable.

Fonctionnalité et Confort :

Le mur ondulant de 80 mètres de long et 7 mètres de haut, taillé avec précision, agit comme un régulateur thermique naturel en limitant les variations de température, essentielles pour la conservation du vin (ArchDaily, 2020-b).



Figure 148 : Le chai Delas, Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt. © Dan Glasser
Source : <https://www.archdaily.com/933696/delas-freres-winery-carl-fredrik-svenstedt-architecte>

Aspect structurel et constructif :

- Structure : Mur porteur
- Type de pierre : Pierre d'Estailade
- Epaisseur de la pierre : ~ 50 cm

Le projet repose sur des fondations dont la nature précise n'est pas détaillée, mais est probablement en béton.

La structure principale est constituée d'une façade en **Pierre massive précontrainte**, s'étendant sur **80,5 mètres** de longueur pour une hauteur variant entre 6,90 et 8,10 mètres (Stono, s. d.). La façade est composée de 278 blocs de pierre calcaire issus des carrières d'Estailade en Provence (ArchDaily, 2020-b).

Chaque pierre est prétaillée avant d'être assemblée sur site, assurant précision et adaptation aux contraintes structurelles. Les blocs, d'une épaisseur de **50 centimètres** (Dezeen, 2020), **sont assemblés sans joint** ; leur stabilité est assurée par des câbles en acier (ArchDaily, 2020-b).

Le plancher et la toiture ne sont pas explicitement décrits dans la documentation disponible mais est également supposé en béton.



Figure 149 : Vues prises lors du chantier du projet Le chai Delas, Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt.
Source : <https://www.stono.fr/project/delas>

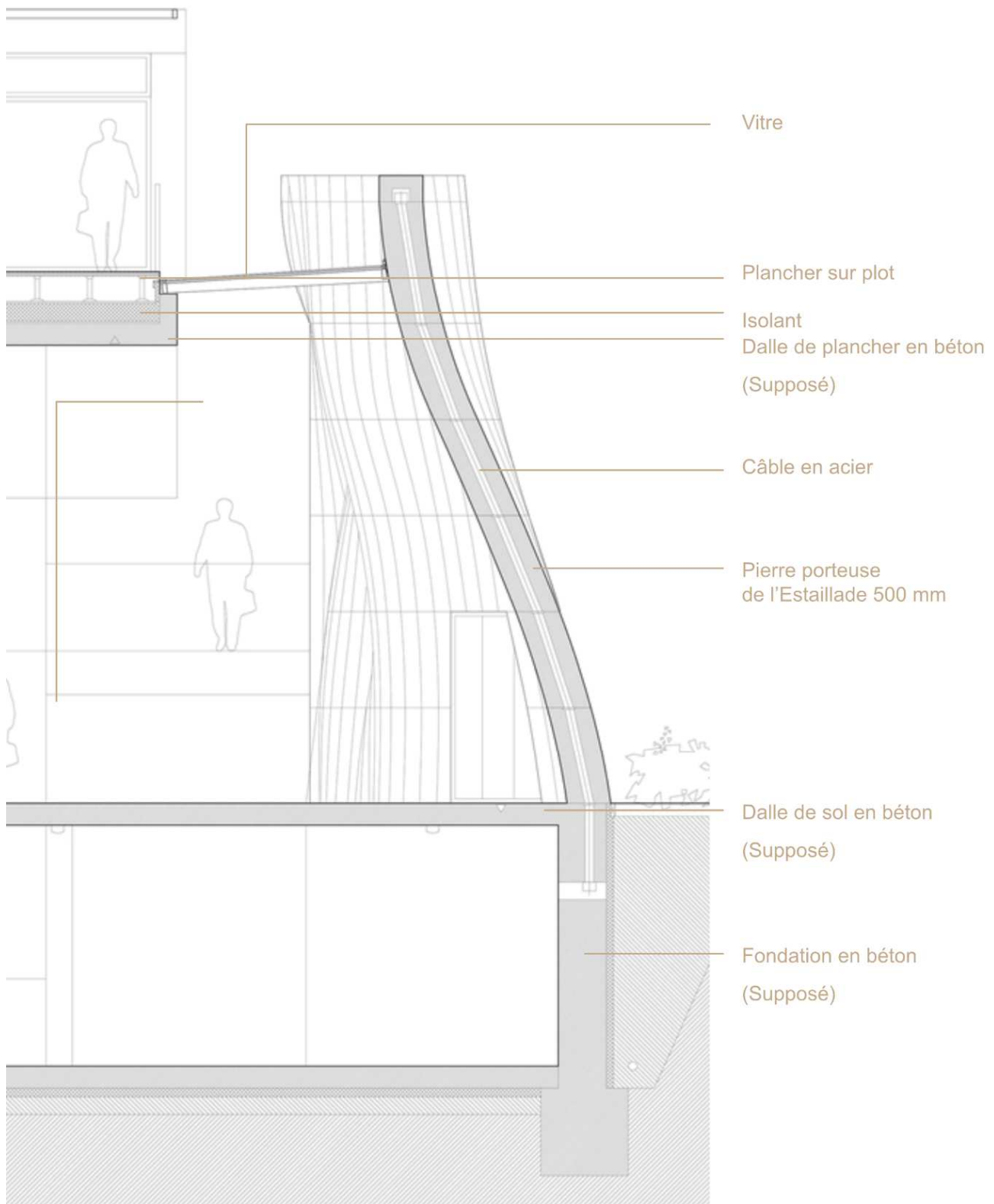


Figure 150 : Coupe longitudinale du projet Le chai Delas, Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt.

Source : <https://www.archdaily.com/933696/delas-freres-winery-carl-fredrik-svenstedt-architecte>

Analyse critique et analytique du projet

La **réversibilité** du projet, bien qu'en apparence simple grâce à l'usage de **câbles**, s'avère en réalité plus **complexe**. En effet, si le **démontage** des murs est techniquement possible, le **réemploi des pierres** reste limité. Cela est principalement dû à l'insertion de **métal** dans les blocs de pierre, ce qui compromet leur réutilisation dans d'autres projets.

D'un point de vue analytique, l'utilisation de la **Pierre précontrainte** associée à des **câbles en acier** confère à l'édifice une grande **stabilité** et une **robustesse structurelle**. Toutefois, ces choix ont un **impact écologique** non négligeable. D'une part, le métal intégré à la pierre rend cette dernière quasiment **non réutilisable**. D'autre part, l'usage d'**acier** et d'autres éléments métalliques contribue à l'**empreinte carbone** du projet bien que leur utilisation reste mineur comparé aux nombres de pierres utilisés. Il est néanmoins important de souligner que le choix de la **Pierre**, en remplacement du **béton**, témoigne d'une volonté d'adopter une approche plus **écoresponsable**. Ce projet met en lumière le **potentiel technique** et **esthétique** de la pierre massive, faisant de lui un cas d'étude particulièrement **intéressant**, tant pour ses qualités **constructives** que pour les **limites** qu'il révèle en matière de **durabilité** et de **réversibilité**.

Tableau synthèse des projets en pierre massive

	Gilles Perraudin - Immeuble mixte 1600m2	Gilles Perraudin & l'Atelier Archiplein - 68 logements collectifs en pierre massive 15 500m2	L'Atelier Archiplein/ FDMP réalisation - Projet Coulouvrenière (10 logements sociaux au bord du Rhône)	Teissier Portal - Groupe scolaire à Opio	Carl Fredrik Svenstedt : Le chai Delas, Tain l'hermitage
Localité	Caluire-et-Cuire, France	Plan-les-Ouates, Suisse	Genève, Suisse	Opio, France	Tain L'Héritage, France
Climat	Climat Tempéré	Climat tempéré	Climat tempéré	Climat tempéré	Climat tempéré
Date de construction	Aucune information	2021	2023	2018	2019
Superficie	1600 m2	15 500 m2	1100 m2	2793 m2	3836 m2
Composition	4 étages	7 étages	3 étages	1 étage	2 étages
Fonction	Immeuble mixte	Immeuble de logements collectifs	Immeuble de logements	Equipement scolaire	Cave viticole et espace de dégustation
Participation locale	Aucune information	Aucune information	Aucune information	Aucune information	Aucune information
Matériau utilisé	Pierre	Pierre	Pierre, bois	Pierre, bois	Pierre
Pierre utilisée	Pierre de Rosal et d'Albamiel	La pierre de Migné et la pierre de Brétigny et d'Estailade	La pierre de Chauvigny, La pierre de Sireuil	Pierre extraite des carrières de Provence	Pierre calcaire des carrières d'Estailade et Fontvieille
Provenance du matériau	Espagne	France	France	France	France
Réversibilité du projet	Facile à moyenne	Facile à moyenne	Moyenne à difficile	Moyenne à difficile	Moyenne à difficile
Réutilisation envisager des matériaux	Réutilisation partielle	Réutilisation complète	Réutilisation partielle	Réutilisation partielle	Réutilisation partielle
Impact écologique	Moyen à élevé	Moyen à élevé	Moyen à élevé	Moyen à élevé	Moyen à élevé

Figure 151 : Tableau récapitulatif des projets en pierre massive.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

L'analyse des cinq projets réalisés en **Pierre massive** met en évidence la **grande adaptabilité** de ce matériau à des programmes architecturaux variés, allant de **l'habitat collectif** à des **équipements publics** . Les surfaces bâties s'échelonnent de **1100 m² à 15 500 m²** , démontrant que la pierre peut convenir aussi bien à des constructions de taille modeste qu'à des projets de grande ampleur. La **hauteur des bâtiments** varie également, allant **d'un à sept étages** , ce qui confirme que la pierre massive peut répondre à des exigences constructives importantes, y compris en **milieu urbain** . Les projets sont tous implantés en Europe.

Dans tous les cas étudiés, la pierre est utilisée comme **matériau structurel principal** , principalement pour des **murs porteurs massifs** , d'une épaisseur généralement comprise entre **30 et 50 cm** . Elle est parfois également employée pour la réalisation de **voûtes** ou **d'éléments architecturaux spécifiques** . Bien que la pierre soit toujours **taillée** , sa **provenance** varie : seul le projet de Gilles Perraudin à Caluire-et-Cuire utilise une pierre importée d'Espagne (Rosal et Albamiel), tandis que les autres projets privilégient des pierres **extraites en France** , limitant ainsi **l'impact environnemental** lié au transport. Ce choix reflète une volonté **d'ancrage territorial** , bien que certaines **discordances** subsistent entre le lieu d'extraction et celui de construction, souvent pour des raisons **économiques** ou **techniques** .

Certains projets combinent la pierre à d'autres matériaux pour répondre à des contraintes spécifiques. Le **bois** est notamment utilisé pour les **planchers** et **toitures** , tandis que la **chaux** peut être incorporée aux **mortiers** . Ces associations facilitent certaines étapes de mise en œuvre et permettent d'adapter les performances de l'ouvrage à son contexte.

En ce qui concerne la **réversibilité** , la majorité des projets offrent une possibilité de **démontage partiel ou total** , qualifiée de **facile à moyenne** . Cela est rendu possible grâce à la nature **modulaire** de la pierre taillée et au type de mortier employé. Toutefois, cette qualité dépend fortement des **choix techniques opérés dès la conception** .

L'impact écologique global de ces projets est estimé entre **moyen et élevé** , en raison notamment du **transport des matériaux** , du **niveau de transformation** de la pierre, et des techniques de mise en œuvre.

Ces études de cas m'ont permis de mieux saisir les **atouts essentiels** de la pierre massive : sa **résistance dans le temps** , sa **faible transformation** et son **ancrage territorial** . Elles nourrissent ma réflexion sur la pertinence d'utiliser des **matériaux durables, locaux** et **historiquement éprouvés** dans l'architecture contemporaine.

Projet vernaculaire en pierre massive

La pierre est un matériau utilisé depuis très longtemps par l'Homme, notamment dans la construction cyclopéenne. Ce terme désigne l'utilisation de grandes pierres, sans avoir recours au mortier ou à tout autre liant pour réaliser les joints.

Cette méthode de construction a été largement employée dans les temples antiques. Ce chapitre présente certaines de ses applications.

Masia, maison rurale catalane

Les masias sont des maisons rurales traditionnelles d'Espagne, servant à la fois d'habitat et de centre d'exploitation agricole (Douce Cahute, s. d.-d). Ces bâtiments sont construits principalement en pierre brute locale, souvent peu taillée, ce qui leur confère une robustesse et une isolation thermique remarquables. Les murs, d'une épaisseur pouvant atteindre de 40 à 90 cm, sont assemblés à l'aide de mortier de chaux ou de mortier ciment (Douce Cahute, s. d.-d). Le plan du bâtiment est généralement rectangulaire. Les masias comportent généralement deux à trois étages, avec des plafonds variés : certains présentent des voûtes, tandis que d'autres ont des plafonds lisses classiques (Douce Cahute, s. d.-d). L'orientation des ouvertures est soigneusement pensée, la plupart étant situées au sud pour maximiser l'ensoleillement naturel et optimiser le confort thermique (Douce Cahute, s. d.-d). Les toits à double versant sont recouverts de tuiles (Douce Cahute, s. d.-d).



Figure 152 : Masia.

Source : <https://maison-monde.com/maison-traditionnelle-catalane/>

Le mas arlésien, habitat typique de Provence

Le mas provençal est un habitat traditionnel du sud de la France, situé dans la région de Provence, caractérisée par un climat méditerranéen (Stouff, 1990). Il s'agit d'un bâtiment isolé, généralement entouré de terres agricoles (Stouff, 1990), associant espace résidentiel et exploitation agricole (BARNES, s. d.).

Construit principalement en pierre, le mas possède une structure simple et robuste. Il est couvert d'un toit à deux pentes réalisé en tuiles et comprend souvent un étage (Stouff, 1990). Le plan de ce bâtiment est généralement un parallélogramme (BARNES, s. d.), bien que certaines variantes adoptent une forme en L (Mercier, 1943).

L'orientation du mas est pensée pour maximiser l'apport de lumière naturelle tout en se protégeant du mistral (Mercier, 1943) et de la chaleur estivale. La façade nord, exposée aux vents froids, comporte très peu d'ouvertures, tandis que les autres façades disposent de fenêtres étroites pour limiter les pertes thermiques (Mercier, 1943).

L'organisation autour d'une cour intérieure (Mercier, 1943) favorise la protection contre les intempéries et optimise la circulation de l'air. Les murs en pierre épais offrent une excellente régulation thermique, garantissant un confort aussi bien en été qu'en hiver. Enfin, les pierres sont assemblées à l'aide d'un mortier à base de terre et de chaux (Mercier, 1943), méthode qui renforce la durabilité du bâtiment tout en assurant une faible empreinte écologique.



Figure 153 : Le mas arlésien, habitat typique de Provence.

Source : <https://www.barnes-provence-littoral.com/fr/2022/les-mas-de-provence-1488-418-0-0>

Tableau synthèse des projets vernaculaires en pierre massive

Critères	Masia, maison rurale catalane	Le mas arlésien, habitat typique de Provence
Climat	Climat méditerranéen	Climat méditerranéen
Plan	Rectangulaire	Parallélogramme, bâtiment en L
Matériaux principaux	Pierre brute locale, mortier de chaux ou de ciment	Pierre, terre et chaux
Système constructif	Mur porteur en pierre	Mur porteur en pierre
Plan intérieur	Pièces réparties, orientation sud	Cour centrale, pièces réparties autour
Adaptation au milieu	Orientation pour maximiser l'ensoleillement	Protection contre le Mistral et chaleur intense
Caractère éphémère / démontable	Non, construction durable	Non, construction durable
Durabilité environnementale	Très bonne, matériaux naturels et durables	Très bonne, matériaux naturels et durables

Figure 154 : Tableau synthèse des projets vernaculaires en pierre massive.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Les masias et les mas arlésiens sont des exemples de constructions vernaculaires, où l'utilisation de la pierre massive et d'autres matériaux naturels répond aux besoins spécifiques des environnements méditerranéens. Ces maisons traditionnelles incarnent une parfaite harmonie avec leur milieu, en tirant parti des ressources locales pour optimiser l'isolation thermique et la résistance face aux intempéries.

Dans cette même lignée, la **construction contemporaine**, la pierre est généralement **taillée**, posée selon un **plan de calepinage**, et presque toujours **liée par des joints** en mortier ou en chaux. Elle est utilisée en **mur porteur**, dans des systèmes constructifs massifs, comme on l'a vu dans les projets précédents.

Cette comparaison souligne la **richesse des techniques traditionnelles**, plus **sobres** et **contextuelles**, et invite à **réinterpréter ces savoir-faire** dans une perspective de **transition écologique** et de **construction bas carbone**, en tirant parti de la durabilité de la pierre tout en adaptant son usage aux enjeux actuels.

Chapitre 4 :

Conclusion de la partie II



L'étude des projets architecturaux utilisant le **bambou**, la **terre crue** et la **Pierre massive** révèle la grande **adaptabilité** et **durabilité** de ces matériaux, tant dans des contextes vernaculaires que contemporains. Le bambou, principalement utilisé pour les **charpentes** et éléments structurels, se distingue par sa **flexibilité** et sa capacité à répondre aux besoins des **climats tropicaux**. Les projets analysés montrent comment l'utilisation **locale** du bambou réduit l'**empreinte écologique** tout en répondant aux exigences climatiques et culturelles, et comment ces constructions, **démontables** et **réparables**, s'inscrivent dans une logique **durable** et **circulaire**.

En ce qui concerne la **terre crue**, utilisée dans des projets en **Asie**, **Afrique** et **Europe**, son faible impact écologique, dû à l'utilisation de terre locale, et sa capacité à s'adapter à divers climats, en font un matériau idéal pour des **architectures durables**. L'intégration de techniques **vernaculaires** et la participation **locale** enrichissent ces projets, en soulignant l'importance de l'**ancrage territorial** et de la réutilisation des savoir-faire anciens en apportant une touche **moderne**.

En ce qui concerne la **Pierre massive**, les projets analysés montrent sa capacité à répondre à des programmes variés, allant de l'**habitat collectif** à des équipements publics, avec une empreinte écologique **modérée** grâce à l'utilisation de pierres **locales** et à des techniques constructives alliant **structure** et **esthétisme**. Les constructions **vernaculaires**, comme les **masias** en Espagne, démontrent la pertinence de la pierre dans des environnements méditerranéens mais également dans tout type de climat.

En conclusion, l'analyse de ces matériaux et projets montre l'importance de réinterpréter les **savoir-faire anciens** pour l'architecture contemporaine, en mettant l'accent sur la **durabilité**, la réduction de l'empreinte écologique et l'**adaptabilité** aux contextes locaux.

PARTIE III

Matériaux et construction : une
discussion croisée

Cette troisième partie de l'étude est dédiée à l'analyse et à l'interprétation des données collectées dans les deux parties précédentes.

L'objectif est de mettre en lumière les **caractéristiques** propres à chaque matériau, ainsi que leurs **complémentarités** potentielles dans des projets architecturaux **durables**. En analysant les **services écosystémiques**, les **propriétés mécaniques** et **physiques** de ces matériaux, cette partie permet d'évaluer leur **impact environnemental** et leur **pertinence technique** dans le cadre d'une construction **écoresponsable**.

Au-delà de l'analyse de leurs **propriétés intrinsèques**, cette partie examine également les **applications concrètes** et **spécifiques** de ces matériaux dans la construction. Le but est de montrer que l'**architecture durable** ne repose pas sur l'utilisation d'un seul matériau, mais sur une réflexion **holistique** qui combine intelligemment les **forces** et les **particularités** de chaque matériau, présent localement et à proximité du chantier, pour optimiser les **performances globales** d'un projet. Cette approche, qualifiée d'**intelligence constructive**, est au cœur de cette analyse.

En combinant des matériaux tels que le **bambou**, la **terre crue** et la **Pierre massive**, il devient possible d'envisager des constructions qui soient à la fois **durables**, **esthétiques** et **fonctionnelles**, tout en répondant aux défis contemporains de la **transition écologique**.

Cette partie s'articule donc autour de cinq grandes analyses :

1. La **comparaison des propriétés** des trois matériaux, à travers un tableau **synthétique**.
2. Une exploration des **synergies possibles** entre ces matériaux dans les projets architecturaux.
3. Une réflexion sur l'**impact structurel** de ces matériaux, en termes de **masse mobilisée** et de **portées estimées** dans des contextes spécifiques de construction.
4. Leur **possibilité utilisation** dans le domaine de la construction sur notre territoire.
5. Une étude sur la **circularité** et l'**impact environnemental** de ces matériaux.

L'analyse comparée de ces matériaux permettra de démontrer la pertinence de leur **utilisation en combinaison**, et d'illustrer que l'**architecture de demain** peut, et doit, tirer parti de l'**intelligence constructive** pour répondre aux enjeux **environnementaux**. Il permet également, à partir de ces 5 aspects de démontrer comment, ces trois matériaux bio et géosourcés réactivent une nouvelle architecture basée sur les ressources et savoir-faire locaux.



Chapitre 1 :

Comparaison des propriétés des matériaux

Ce tableau compare les différentes propriétés et qualités des trois matériaux étudiés pour mettre en lumière des similitudes ou complémentarités.

	Critères	Bambou	Terre crue	Pierre
Services écosystémiques	Services environnementaux (sol, eau, air)			
	Amélioration et restaurations de la qualité des sols	✓		
	Dépollution des sols	✓		
	Lutte contre l'érosion	✓		
	Gestion des eaux pluviales	✓		
	Captation du dioxyde de carbone (100 ans)	✓		
	Régulation du climat		✓	
	Réduction de l'empreinte carbone		✓	✓
	Amélioration de la qualité de l'eau	✓		
	Conservation des ressources	✓	✓	✓
	Services sociaux (alimentation, bien être, santé)			
	Alimentaire	✓		
	Services économiques			
	Cycle de croissance rapide	✓		
	Approvisionnement en matériaux durables		✓	✓
	Faible coût	✓	✓	
	Services culturels			
	Valorisation de techniques ancestrales	✓	✓	✓
Propriétés mécaniques	Bonne résistance à la compression		✓	✓
	Flexibilité et élasticité	✓		
	Matériau lourd, massif		✓	✓
	Bonne résistance à la traction	✓		
Propriétés physiques	Faible conductivité thermique	✓		
	Régulation thermique (régulation de la chaleur)		✓	✓
	Régulation hygrométrique (régulation de la vapeur d'eau)	✓	✓	✓
	Bonne absorption acoustique		✓	✓

Figure 155 : Tableau comparatif sur les propriétés des trois matériaux (bambou, terre crue, pierre massive).

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.



Chapitre 2 :

Analyse des usages
spécifiques en construction
et les synergies entre
matériaux

Ce tableau met en évidence les usages du bambou, de la terre crue et de la pierre massive, ainsi que leurs applications les plus adaptées en construction. L'objectif est de souligner la complémentarité de ces matériaux et d'orienter leur utilisation selon leurs atouts respectifs.

C'est précisément l'enjeu de cette étude : montrer que l'architecture ne repose pas sur un matériau unique, mais sur une composition réfléchie qui optimise les qualités de chacun. Il est donc essentiel de sélectionner le bon matériau pour chaque usage et d'en maîtriser les quantités avec intelligence.

Ce tableau présente une échelle d'adaptabilité des matériaux aux parois sélectionnées :

- **X Non adapté** : le matériau ne peut pas être utilisé pour cette paroi.
- **✓Possible**: le matériau peut être utilisé, mais nécessite un élément complémentaire pour être fait.
- **✓ Adapté** : le matériau est parfaitement compatible avec la paroi proposée.

	Bambou	Terre crue	Pierre massive
Fondation/ Soubassement	X Non adapté	X Non adapté (sensible à l'humidité)	✓ Adapté
Dalle de sol	X Non adapté	✓ Possible (sensible à l'humidité mais peu avoir recours à l'ajout de ciment)	✓ Adapté
Mur structurel massif	X Non adapté	✓ Adapté	✓ Adapté
Mur à ossature ou à colonne	✓ Adapté	X Non adapté	X Non adapté
Parement mural	✓ Adapté (par exemple un tissage)	✓ Adapté	✓ Adapté
Dalle de plancher	✓ Adapté en charpente (avec un revêtement adapté pour finir la dalle)	✓ Adapté (par exemple en voûte)	✓ Adapté (par exemple en voûte)
Charpente	✓ Adapté	X Non adapté	X Non adapté

Figure 156 : Tableau comparatif sur les usages en construction des trois matériaux. (bambou, terre crue, pierre massive).

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Ce tableau, en mettant en lumière les usages complémentaires du bambou, de la terre crue et de la pierre massive dans la construction, permet d'envisager leur combinaison au sein d'un même projet architectural. Chacun de ces matériaux possède des qualités propres qui, lorsqu'elles sont judicieusement associées, ouvrent la voie à une architecture cohérente et durable, fondée sur une logique d'intelligence constructive.

L'intelligence constructive, c'est utiliser le bon matériau, au bon endroit et en bonne quantité. Cette approche permet d'imaginer des associations cohérentes et pertinentes entre ces matériaux :

- **La pierre massive**, adaptée aux zones en contact avec le sol, peut jouer un rôle fondamental en soubassement et en fondation, assurant une base solide et durable. C'est un matériau remarquable par sa capacité à s'adapter à tous les climats : contrairement à d'autres matériaux sensibles aux variations environnementales, la pierre massive n'est pas affectée par un climat particulier ou un régime de pluie spécifique. Sa résistance naturelle à l'eau en fait également un excellent choix non seulement pour les structures, mais aussi pour la protection contre l'humidité.
- **La terre crue**, sensible à l'humidité, peut être posée sur ce socle minéral, à distance du sol, pour composer les murs porteurs. Elle se distingue par ses qualités d'inertie thermique et d'hygrothermie, apportant un confort intérieur naturel. Selon les contextes, elle peut aussi être utilisée en mur, en chape ou en dalle, à condition d'être protégée de l'eau.
- **Le bambou**, grâce à sa souplesse et sa résistance à la traction, est particulièrement adapté à la réalisation de la charpente. Il peut supporter une couverture légère tout en protégeant les parois en terre crue de l'humidité de la pluie.

Ainsi, bien que chacun de ces matériaux présente des limites d'usage en construction, leur combinaison permet d'en tirer parti de manière complémentaire et d'intelligence constructive. Une architecture qui les intègre tous est envisageable, à condition de répondre aux exigences techniques, notamment en matière de **finitions** (revêtement de toiture, étanchéité, etc.). Pour cela, le recours à d'autres matériaux **biosourcés** ou **géosourcés compatibles** peut permettre de compléter la construction de manière cohérente et durable.

Le schéma ci-après vient clore l'analyse en offrant une vue d'ensemble claire et structurée des usages les plus pertinents et récurrents du bambou, de la terre crue et de la pierre massive. Il illustre non seulement la complémentarité de ces matériaux, mais met également en lumière leur intégration déjà effective dans de nombreux contextes constructifs, avec des résultats probants tant sur le plan structurel qu'en matière de durabilité environnementale. Ce schéma démontre ainsi qu'ils constituent des alternatives crédibles aux matériaux conventionnels aujourd'hui majoritairement employés dans le secteur de la construction.

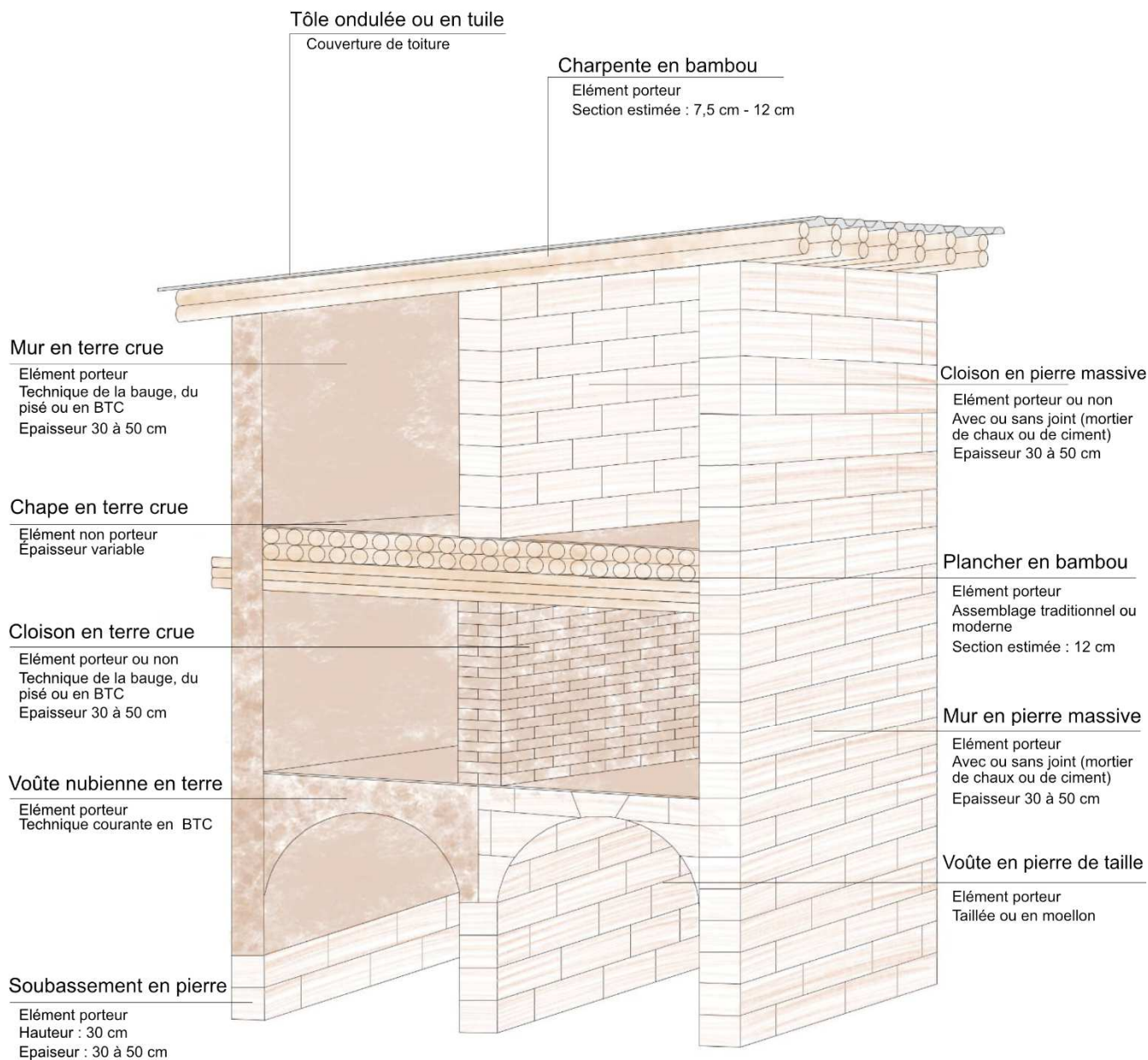


Figure 157 : Schéma synthétique des possibilités d'usages du bambou, de la terre crue et de la pierre massive.
Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Exemple architectural utilisant des synergies entre matériaux :

En complément du tableau et du schéma précédents, deux projets construits illustrent de manière exemplaire la pertinence d'une combinaison intelligente de matériaux en fonction de leurs propriétés. Le **Bamboo Hostels** et le **Desi Training Center**, tous deux réalisés par Anna Heringer, témoignent d'une approche architecturale durable, contextuelle et respectueuse de l'environnement. À travers ces réalisations, l'utilisation harmonieuse du bambou, de la terre crue et d'autres matériaux locaux montre comment l'intelligence constructive permet de créer des architectures à la fois performantes, adaptées au climat et profondément ancrées dans leur territoire.

Bamboo Hostels de Anna Heringer



Figure 158 : Bamboo Hostels d'Anna Heringer. @Jenny Ji
Source : <https://www.archdaily.com/950733/bamboo-hostels-china-studio-anna-heringer>



Figure 159 : Le projet Bamboo Hostels, signé Anna Heringer. © Jenny Ji
Source : <https://www.archdaily.com/950733/bamboo-hostels-china-studio-anna-heringer>

1. Une approche architecturale responsable de l'environnement

Consciente de l'impact écologique de la construction, Anna Heringer adopte une démarche résolument durable. Elle cherche à créer une architecture en harmonie avec son contexte naturel, culturel et social. Son projet des *Bamboo Hostels*, situé en Chine, reflète cet engagement par l'usage raisonné de matériaux locaux et naturels (ArchDaily, 2020-a; Mollard, 2016).

Plutôt que de recourir au béton, l'architecte fait le choix de tirer parti des qualités propres de chaque matériau :

- **Pierre** en fondation et soubassement,
- **Terre crue** (technique du pisé) en mur porteur,

Bambou en structure verticale et en tissage de l'enveloppe extérieure (ArchDaily, 2020-a; Gauzin-Müller et al., 2019).

2. Une intelligence constructive

Ce projet illustre la **complémentarité entre la pierre, la terre crue et le bambou** dans une même construction. L'ensemble repose sur une logique de bon matériau au bon endroit.

Fondations et structure verticale

- Le noyau central repose sur une base en **empilement de moellons de pierre** à sec (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).
- Sur cette assise, s'élèvent des **murs en pisé**, formant la structure porteuse du rez-de-chaussée.

Enveloppe en bambou

- La **structure verticale en bambou** est ancrée dans la pierre grâce à des tubes d'acier scellés au béton, dans lesquels les tiges de bambou sont insérées.
- Ces tiges sont assemblées entre elles par des **boulons traversants**, puis maintenues ensemble par des **anneaux métalliques** qui soutiennent le tissage de l'enveloppe extérieure (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).
- Le **tressage en bambou** met en valeur la souplesse et la légèreté du matériau, tout en créant une façade respirante.

Attention, l'ajout de béton dans ce projet résulte d'une volonté imposée par l'entrepreneur local, et non d'un choix volontaire de l'architecte car il n'avait pas confiance aux matériaux (Heringer & Gauzin-Müller, 2024).

3. Une œuvre entre savoir-faire local et innovation

Au-delà de la performance structurelle, ce projet met en lumière :

- l'importance du **savoir-faire artisanal local**,
- la **cohérence entre choix de matériaux, techniques constructives et logique environnementale**,
- la **valorisation des ressources locales**.

Anna Heringer réussit ici à combiner **esthétique, fonctionnalité et durabilité**, tout en inscrivant son œuvre dans une culture architecturale vernaculaire réinterprétée.

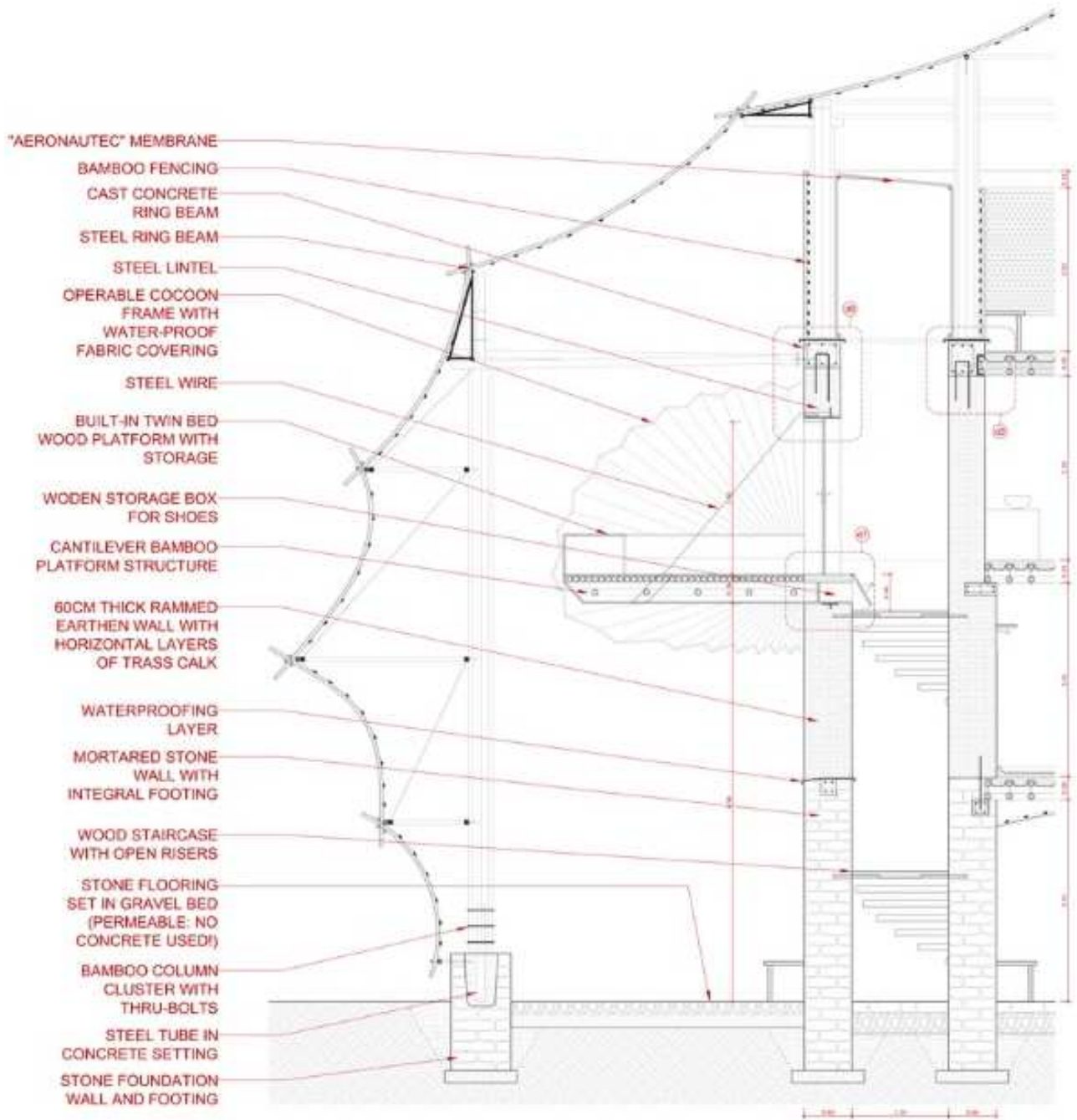


Figure 160 : Dessins techniques du Bamboo Hostels d' Anna Heringer.
 Source : <https://www.archdaily.com/950733/bamboo-hostels-china-studio-anna-heringer>

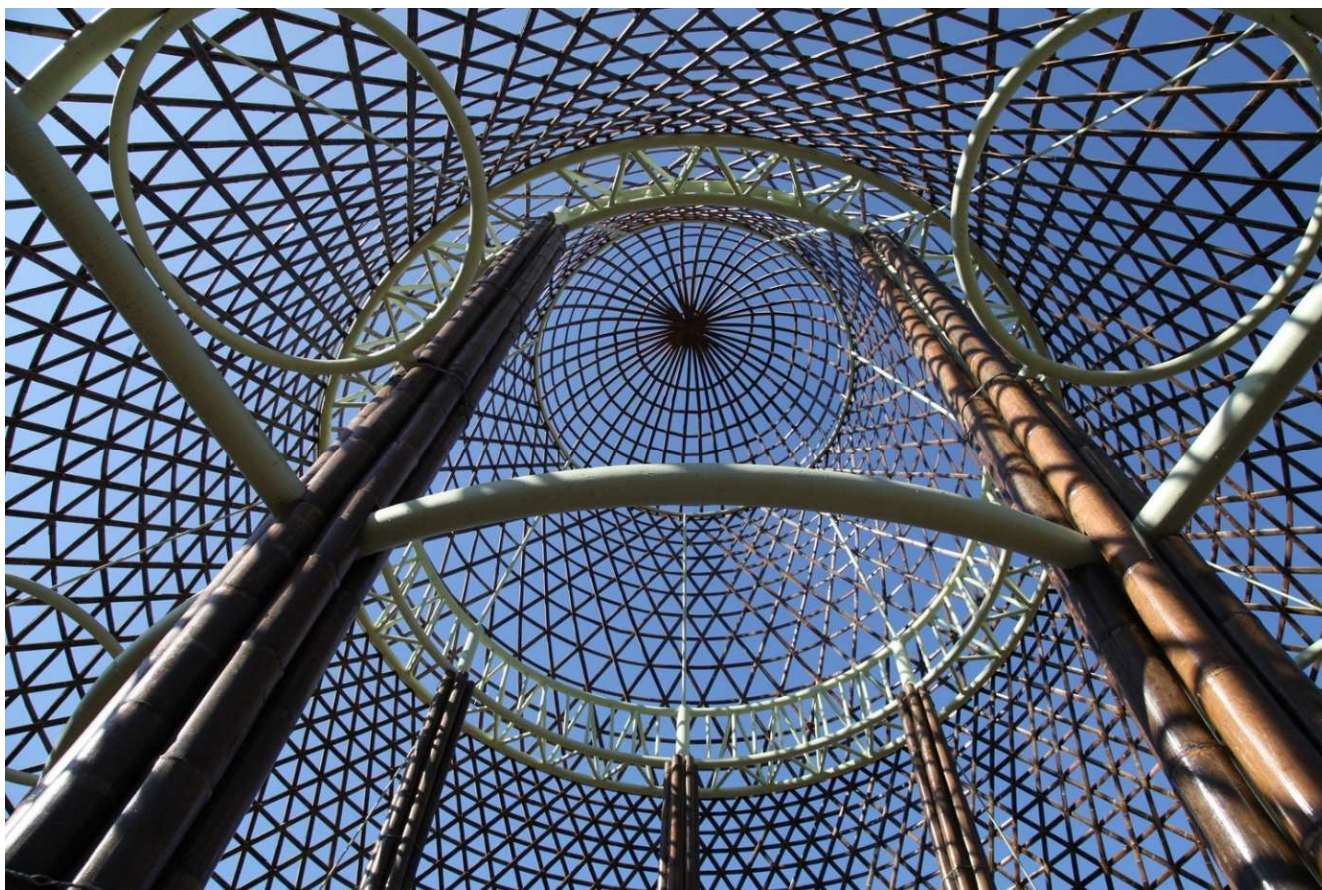


Figure 161 : Photo de la structure du Bamboo Hostels d'Anna Heringer. © Jenny Ji
Source : <https://www.archdaily.com/950733/bamboo-hostels-china-studio-anna-heringer>



Figure 162 : Bamboo Hostels d'Anna Heringer en construction. © Jenny Ji
Source : <https://www.archdaily.com/950733/bamboo-hostels-china-studio-anna-heringer>

Desi training center – Anna Heringer

Ce projet a été étudié dans la deuxième partie, chapitre 1, pour ses aspects liés à l'usage du bambou. Ici, l'objectif est de mettre en valeur, à travers ce projet, l'hybridation entre les matériaux terre et bambou.

Le projet illustre l'hybridation dans la réalisation d'une dalle de sol. Peu d'informations précises sont disponibles concernant la fabrication de cette dalle, mais d'après l'analyse des photographies, elle semble composée de plusieurs couches. Selon la taille du projet, un premier lit de bambous, constitué de 2 à 4 éléments, est posé, puis un second lit est disposé perpendiculairement au premier, également composé de 2 à 4 bambous. Il est supposé qu'un tissage en bambou est ajouté afin d'obtenir une surface plus opaque. Enfin, il est probable qu'une couche de terre coulée soit appliquée pour consolider l'ensemble et obtenir une finition lisse.

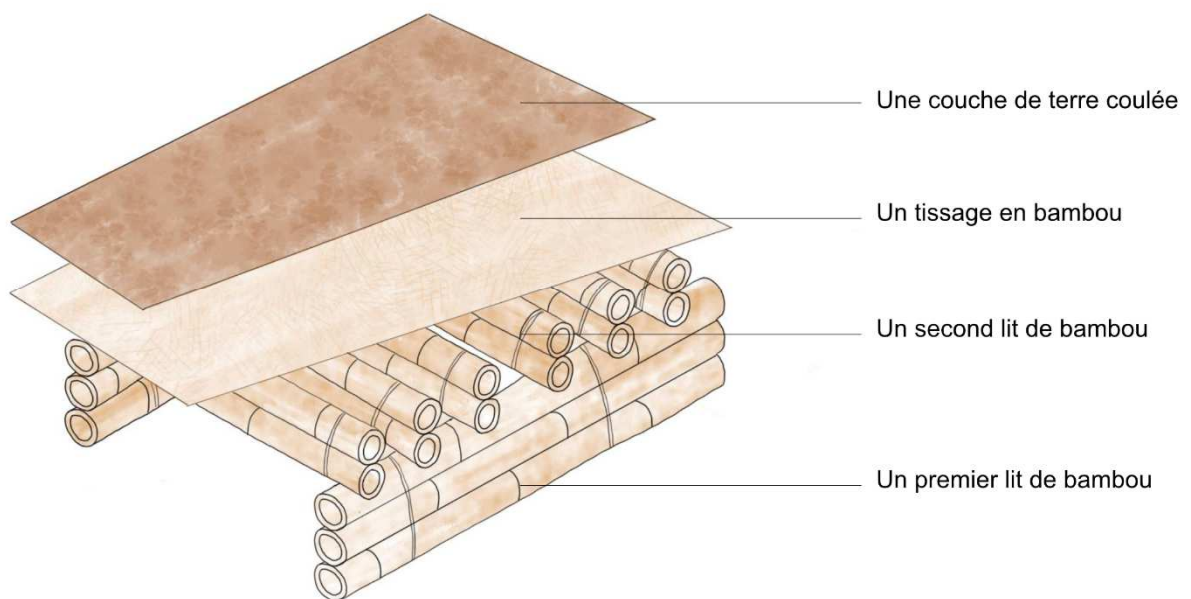


Figure 163 : Schéma explicatif de la dalle de plancher du projet Desi training center d'Anna Heringer.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Chapitre 3 :

Comparaison
structurelle des
matériaux



Quantité de matériaux mobilisés

Afin d'apporter un éclairage quantitatif sur la masse des matériaux impliqués selon leur usage structurel, cette étude compare la quantité de matière mobilisée pour la réalisation d'un mur de 1 mètre de long sur 1 mètre de haut, soit 1 m² de surface murale. Cette approche permet d'établir des rapports concrets entre les matériaux utilisés dans les structures porteuses.

Données utilisées :

- **Bambou** : La densité du bambou varie autour de **500 à 600 kg/m³**, mais cela peut varier en fonction de l'espèce et du traitement (Bamboo Concept, s.d.).
- **Terre crue** : **Les briques de terre comprimée** ont une densité d'environ **1400-1700 kg/m³** (Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024).
- **Pierre massive** : La densité de la pierre varie selon le type, mais elle tourne généralement autour de **1300 à 2700 kg/m³** (Laurent, 2011).

Formule : Quantité de matière (kg/m²)=densité (kg/m³)×épaisseur (m)

Ces valeurs sont **approximatives** et doivent être considérées comme des **estimations indicatives**, basées sur des projets analysés et des données techniques moyennes. Ces résultats peuvent varier en fonction des mises en œuvre spécifiques, des finitions et des choix de conception. Ils concernent uniquement la structure du mur (la matrice principale) et n'incluent pas les couches complémentaires telles que les enduits, isolants ou revêtements.

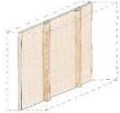


	Type de mur	Schéma d'1 m ² du mur	Densité moyenne (kg/m ³)	Quantité de matière approximative (kg/m ²)	Remarques
Bambou	Ossature verticale (avec un tressage en bambou). Structure porteuse.	 <small>Figure 164 : Schéma d'un mur en bambou. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</small>	≈ 550	≈ 20-40	Structure légère, avec un entraxe de 50 cm Section du bambou ≈ 10cm Épaisseur du tressage ≈ 5 cm
Terre crue	Mur porteur en briques de terre comprimés (BTC). Élément porteur.	 <small>Figure 165 : Schéma d'un mur en BTC. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</small>	≈ 1550	≈ 500-800	Masse élevée, épaisseur comprise 30 et 50 cm
Pierre massive	Mur porteur en blocs taillés en pierre. Élément porteur.	 <small>Figure 166 : Schéma d'un mur en pierre massive. Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.</small>	≈ 2200	≈ 700-1200	Masse élevée, épaisseur comprise 30 et 50 cm.

Figure 167 : Calcul de la quantité de matière pour 1 m² de mur.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Conclusion comparative :

Par rapport au bambou, la **terre crue** mobilise environ **12 à 40 fois plus de matière**, tandis que la **pierre massive** en mobilise **17 à 60 fois plus**. Ce contraste souligne le caractère particulièrement **léger** du bambou, adapté à des structures fines et souples, là où la terre crue et la pierre, toutes deux **massives**, répondent à des exigences de portance. Comparativement, la pierre massive requiert **0,9 à 2,4 fois plus de matière que la terre crue**, ce qui montre que, bien que proches en fonction structurelle, ces deux matériaux peuvent varier fortement en poids selon les épaisseurs mises en œuvre.

Estimation des portées en fonction des matériaux

Il a été vu dans l'analyse de projets que les matériaux de construction peuvent être sollicités de différentes manières, mais également qu'ils offrent des possibilités de portées variables. Une **portée** désigne la distance libre entre deux appuis, sans support intermédiaire. Elle reflète la capacité d'un matériau à franchir un espace sans fléchir ou s'effondrer, ce qui est essentiel dans la conception architecturale.

Ce tableau s'est construit à partir des projets précédemment étudiés et à travers des exemples de d'autres projets ou constructions qui montre le potentiel de ces matériaux.

Matériau	Portée typique	Portée max. observée	Remarques
Bambou	3-6 m	~ 10-17 (charpente de toiture)	Léger, souple, bonne flexion
Terre crue	2-4 m	~ 5-6 m (toiture)	Fonctionne en compression
Pierre massive	3-5 m	~ 25 m (ouvrage d'art)	Fonctionne en compression

Figure 168 : Tableau comparatif des portées des trois matériaux.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Exemple de projet :

Projet avec de grandes portées en bambou

Un précédent projet étudié qui obtient une portée de 17 mètres, le projet de Chiangmai Life Construction , le Bamboo Sports Hall for Panyaden International School (ArchDaily, 2021-b).

Projet avec de grandes portées en terre crue

Les portées plus grandes en terre sont faite avec une brique qui est cuite. Par contre, dans les projets précédemment étudiés, nous remarquons que le projet de DAWOffice avec le projet CEM Kamanar arrive à une portée de presque 6 mètres avec des BTC stabilisé avec un peu de ciment (Archello, s. d).

Projet avec de grandes portées en pierre massive

Bien que n'étant pas un bâtiment, le Pont-du-Gard illustre parfaitement le potentiel structurel de la pierre massive. Ce savoir-faire ancien, porté par une ambition remarquable, reste transposable à l'architecture contemporaine. L'aqueduc atteint une **portée** de **24,52 m** et une **hauteur** de **21,87 m**, bien supérieures aux standards actuels. Il se supporte à lui-même.

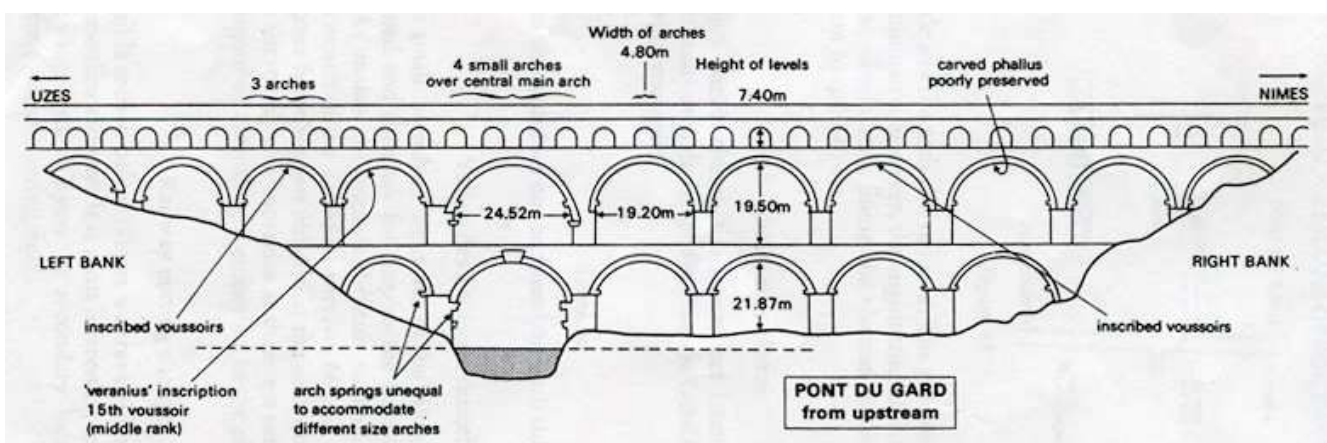


Figure 169 : Pont du Gard.

Source : <https://romeonrome.com/2016/10/provence-the-roman-province-along-the-via-domitia/>

Chapitre 4 :

Ces matériaux en
application en Belgique



Ce tableau met en évidence les potentialités offertes par les trois matériaux étudiés en envisageant leur mise en œuvre, leur utilisation en construction en Belgique. Ce tableau permet de comparer les avantages et les limites de chacun de ces matériaux. Il contribue à déconstruire certaines idées reçues et à ouvrir le champ des possibles en matière de construction écologique, locale et adaptée aux enjeux actuels en prouvant qu'il est possible de construire mieux dans nos régions.

Critères	Bambou	Terre crue	Pierre massive
Disponibilité locale	La présence de bambou à l'état naturel en Belgique est très limitée. Quelques plantations existent, comme Lil'ô Bambous près de Namur ou la culture développée par Matthieu Degallaix à Wez-Velvain. Plusieurs pépinières spécialisées assurent également une production artisanale : Bambou du Bois à Courcelles, Jardin & Bambou à Waterloo et la Pépinière Hamblenne à Namur.	Abondante. Présente sur une grande partie du territoire, souvent disponible directement sur site ou valorisable via les terres d'excavation.	Disponible dans de nombreuses carrières réparties en Wallonie.
Disponibilité frontalière	France (Bambouseraie en Cévennes, Parc aux Bambous à Lapenne), Irlande (Glengarriff Bamboo Park) par exemple.	Présente en abondance dans tous les pays frontaliers (France, Allemagne, Luxembourg, Pays-Bas).	Les régions calcaires et gréseuses se trouvent dans plusieurs zones d'Europe. En France, elles se concentrent dans le Bassin parisien, la Bourgogne, la Charente, la Provence et les Vosges (CTMNC & UNTEC, 2015). En Espagne, elles sont surtout présentes dans le sud et l'est du pays. En Suisse, elles sont réparties sur l'ensemble du territoire, notamment dans les cantons de Vaud, Fribourg et Neuchâtel. En Allemagne, en Italie, au Portugal et en Angleterre (la pierre de Portland) également.
Transformation nécessaire avant usage	Séchage et traitements nécessaires pour éviter l'attaque d'insectes et améliorer sa durabilité (Gnanaharan, 2002; Hidalgo, 2018; Nurdiah, 2016).	Façonnage simple sous forme de briques, de pisé ou bauge, nécessitant un séchage naturel (Doat et al., 1979; Minke, 2009). Certaines terres doivent subir un traitement ou façonnage pour être améliorée.	Taille et calepinage indispensables pour assurer la stabilité.
Nécessité d'amélioration du matériau	Le bambou peut être utilisé pour des structures en Belgique à condition d'être traité. Sa résistance peut être améliorée par un remplissage rigide (ciment/béton) à l'intérieur.	La terre crue peut être utilisée en Belgique, mais sa vulnérabilité à l'eau exige des précautions. L'ajout de chaux ou de ciment (5 à 10%) améliore sa résistance. Un toit en surplomb et un soubassement dur sont essentiels pour la protéger des intempéries et éviter l'érosion (Guide Bâtiment Durable.Brussels, 2024).	Peut être utilisée brute, mais nécessite un taillage précis.

Figure 170 : Tableau d'analyse sur l'application du bambou, de la terre crue et de la pierre massive en Belgique.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

L'analyse de la disponibilité des ressources en Belgique met en évidence des disparités entre les trois matériaux étudiés :

- **La terre crue et la pierre massive** présentent un **fort potentiel local**. Elles sont abondantes, relativement simples à mettre en œuvre, et leur utilisation est historiquement ancrée dans le territoire.
- **Le bambou**, quant à lui, reste une **ressource émergente**. Bien qu'il présente un réel intérêt structurel (légèreté, flexibilité et résistance à la traction) **son utilisation en Belgique demeure complexe**. En effet, le climat belge, différent de celui des régions où le bambou pousse naturellement, ne permet pas d'obtenir les mêmes performances. Les bambous cultivés localement auront donc des propriétés mécaniques moindres que ceux issus de leurs zones d'origine



Chapitre 5 :
Circularité et impact
environnemental

Tableau circularité

D'après la Commission européenne, l'économie circulaire repose sur la préservation maximale de la valeur des produits et des matériaux tout au long de leur cycle de vie. Elle vise à minimiser la production de déchets et l'exploitation des ressources, tout en garantissant que les matériaux issus des produits en fin de vie restent intégrés dans le circuit économique afin d'être réutilisés et de générer à nouveau de la valeur. C'est une économie où on utilise les matériaux le plus longtemps que possible (European Commission, s. d.).

Ce tableau s'est construit en ayant comme ressource le cours de Sciences et techniques 2, présenté par Sophie Trachte. Il aborde donc ce terme sous différents indicateurs défini comme tels :

- **Réemploi** : Toute action consistant à réemployer des produits ou composants, encore fonctionnels et non considérés comme des déchets, dans le même usage que celui pour lequel ils ont été initialement conçus.
- **Valorisation** : Ensemble des techniques permettant de donner une nouvelle utilité aux déchets ou matériaux en fin de vie, en les intégrant dans un nouveau cycle d'utilisation, qu'il soit énergétique ou matériel. (valorisation énergétique ou valorisation organique)
- **Recyclage** : Procédé par lequel un matériau usagé est traité et transformé afin d'être réutilisé pour la fabrication de nouveaux produits, réduisant ainsi le gaspillage de ressources naturelles.
- **Upcycling** : Il s'agit d'une approche visant à préserver et prolonger la valeur des matériaux composant les produits, tout en les réintégrant dans un processus de production.
- **Downcycling** : Processus inverse de l'upcycling, où un matériau est recyclé en un produit de moindre qualité ou de valeur inférieure par rapport à son usage initial.

Ce tableau fonctionne avec ce symbole : ✓

	Réemploi	Valorisation	Recyclage	Upcycling	Downcycling
Bambou	✓ Il peut être réutilisé dans d'autres projets	✓ Valorisation organique si il n'a pas eu de traitement Valorisation thermique si il a eu un traitement	-	-	✓ Dégradation en copeaux pour l'amendement des sols
Terre crue	✓ Il peut être réutilisé dans d'autres projets	✓ Valorisation organique par réintégration dans le sol ou dans un nouveau mélange terreux	-	✓ Il peut être réutilisé dans d'autres projets	-
Pierre massive	✓ Il peut être réutilisé dans d'autres projets	-	-	✓ Il peut être réutilisé dans d'autres projets	✓ Il peut être retaillé et utilisé pour un pavage ou encore broyage en granulats par exemple

Figure 171 : Tableau d'analyse sur la circularité des trois matériaux (bambou, terre crue, pierre massive).

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Utilisation de l'outil TOTEM

Description de l'outil TOTEM

Cette description a été rédigée sur base du livre « Isolants thermiques en rénovation : Réaliser un choix équilibré entre confort, performance énergétique, approche environnementale et gestion circulaire des ressources » (Trachte & Stiernon, 2023).

L'outil **TOTEM** (*Tool to Optimise the Total Environmental Impact of Materials*) est une plateforme accessible à tous, conçue pour évaluer et optimiser l'impact environnemental des matériaux de construction. Il propose une **banque de données étendue** regroupant de nombreux matériaux, permettant de composer, de manière interactive, différentes parois de construction. Cet outil est adapté aux particuliers et aux professionnels du secteur de la construction en Belgique. Il permet aux utilisateurs de concevoir des solutions adaptées à leurs besoins, d'en évaluer l'impact environnemental, puis d'ajuster certains paramètres afin d'améliorer le score obtenu.

Indicateurs environnementaux

Il intègre 12 indicateurs environnementaux qui permettent d'évaluer l'impact environnemental par indicateur et par étape du cycle de vie. Ces données sont exprimés à travers un tableau téléchargeable.

Bibliothèque

La bibliothèque de TOTEM est **très complète** et décrit précisément chaque matériau (assemblage, composition, fixations, etc.), en fonction des usages courants en Belgique. C'est pour cette raison que certains matériaux, comme le bambou, ne peuvent pas être évalués dans cette étude. Les utilisateurs peuvent modifier plusieurs caractéristiques des matériaux, notamment :

- l'**épaisseur**,
- la **valeur lambda** (λ , conductivité thermique),
- le **statut** du matériau (neuf, existant, réemployé in situ, réemployé ex situ, démolé), ce qui influence directement le bilan environnemental global de la paroi.

Une fois les parois modélisées, TOTEM génère différents résultats, parmi lesquels la **valeur U** (coefficient de transmission thermique). En Wallonie, la réglementation impose une valeur U maximale de 0,24 W/m²K pour garantir une bonne conductivité thermique. Cela permet donc d'obtenir une idée de où se situe la paroi créée et d'émettre des comparaisons entre différentes parois.

Réversibilité et circularité

Il fournit aussi toute une série d'autres résultats, comme le score environnemental, l'impact sur le changement climatique, l'impact par composant, l'impact des matériaux vs énergie, l'impact par étape du cycle de vie, l'impact par indicateurs, le flux de matière ainsi que les connexions et réversibilité.

La **réversibilité** des parois se présente comme tel:

- une connexion réversible est affichée en **vert**,
- une connexion réversible, dommages réparable est affichée en **jaune**,
- une connexions réversibles, dommages non réparables est affichée en **orange**,
- une connexion non réversible est affichée en **rouge**.

Cela permet de concevoir des constructions plus durables et plus facilement démontables, en favorisant l'économie circulaire.

Analyse des différentes parois fictives

L'objectif de cette étude est de réaliser une analyse comparative entre quatre types de parois : un mur traditionnel couramment construit en Belgique, considéré comme représentatif des pratiques actuelles, deux murs en terre crue et un mur en pierre massive. Cette comparaison permettra d'évaluer les différentes performances de ces parois afin de mieux comprendre leurs avantages et leurs limites dans un contexte de construction durable. Afin d'obtenir une meilleure comparaison, une attention particulière a été apportée aux valeurs U de toutes les parois afin d'avoir une même valeur ou du moins une très semblable.

Beaucoup d'architectes évoquent la construction à faible impact environnemental, mais mon objectif est d'évaluer réellement le bilan environnemental, en tenant compte des possibilités offertes par l'outil, qui reste aujourd'hui limité par rapport à la diversité des matériaux.

- Mur fictif typique en Belgique :

En Belgique, la construction la plus représentative pour les habitations est celle du double mur. Ce système est largement utilisé dans l'élaboration des bâtiments. Voici les différents composants de ce type de paroi :

- $U = 0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Epaisseur du mur = 0.38 mètres



Figure 172 : Mur fictif typique en Belgique généré avec l'outil TOTEM.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

- Mur fictif en terre crue avec ossature bois :

L'outil TOTEM propose encore peu d'options pour les constructions en terre crue. En effet, il se limite principalement à l'utilisation de briques de terre comprimée (BTC) pour modéliser ce type de mur. Afin de représenter une paroi en pisé, deux couches de BTC ont été intégrées dans la composition. Cette solution permet de conserver l'esthétique extérieure de la terre. Cependant, l'ajout d'une ossature bois avec un isolant fait perdre une partie de l'inertie thermique naturelle de la terre.

- $U = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Epaisseur du mur = 0.47 mètres

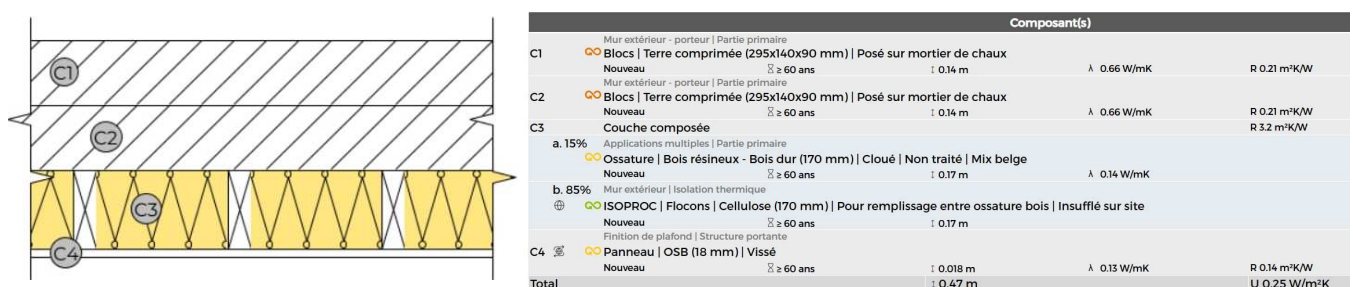


Figure 173 : Mur fictif en terre crue avec ossature bois généré avec l'outil TOTEM.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

- Mur fictif en terre crue avec du liège :

Cette paroi propose une autre manière de construire un mur en terre crue, avec pour objectif d'avoir la terre apparente des deux côtés. Elle allie ainsi esthétique et conservation des propriétés thermiques et hygroscopique à l'intérieur. Ce type de mur est notamment utilisé par l'architecte Martin Rauch.

- $U = 0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Epaisseur du mur = 0.43 mètres



Figure 174 : Mur fictif en terre crue avec du liège généré avec l'outil TOTEM.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

- Mur fictif en pierre :

Actuellement, les possibilités d'utilisation de la pierre sont limitées sur l'outil, ce qui conduit à privilégier l'emploi de moellons. Il aurait également été préférable d'associer ces moellons à un mortier à la chaux, mais cette option n'est pas disponible dans l'outil. Dans ce cas de figure, la pierre est utilisée pour sa masse, combinée à un isolant afin d'améliorer les performances thermiques à l'intérieur.

- $U = 0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Epaisseur du mur = 0.63 mètres

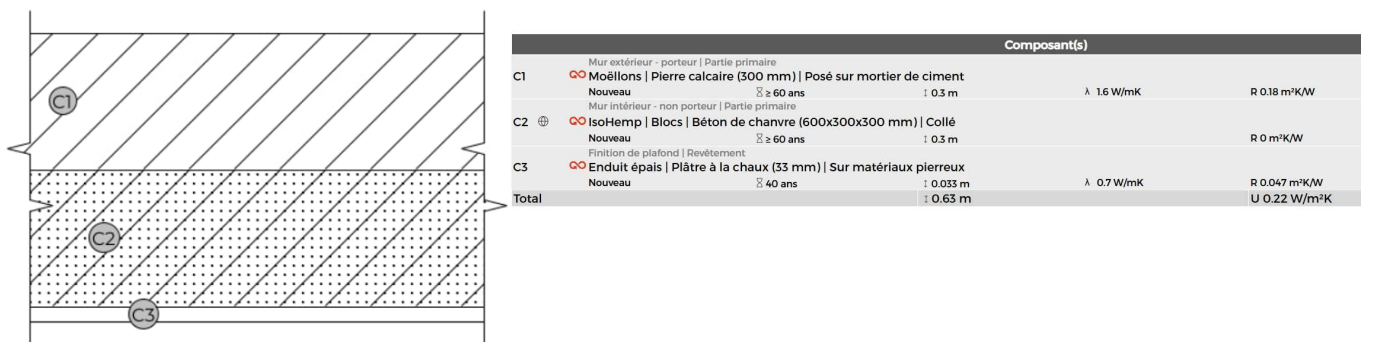


Figure 175 : Mur fictif en pierre généré avec l'outil TOTEM.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Analyse par indicateur

Pour réaliser ce tableau, l'outil TOTEM a de nouveau été utilisé, en s'appuyant sur les différents murs fictifs modélisés et présentés précédemment dans ce travail. Dans la section des résultats de l'outil, l'option "impact par indicateur" a été sélectionnée, avec une analyse effectuée « par matériau ». Parmi l'ensemble des résultats détaillés fournis par la plateforme, cinq indicateurs ont été jugés les plus pertinents et sont présentés dans le tableau ci-dessus. S'inscrivant dans une démarche d'architecture écoresponsable, cette analyse vise à limiter l'usage des ressources, notamment énergétiques, à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à privilégier l'emploi de matériaux puits de carbone et à restreindre la consommation d'eau. Un focus particulier est porté sur le changement climatique et sur les ressources de manière large.

- **Changement climatique – biogénique** : Cet indicateur mesure l'impact sur le changement climatique lié au stockage carbone biogénique.
- **Changement climatique** : C'est l'indicateur global du changement climatique, exprimé en kg CO₂ équivalent. Il tient compte de toutes les émissions de gaz à effet de serre générées durant tout le cycle de vie d'un matériau.
- **Épuisement des ressources abiotiques - minéraux et métaux** : Cet indicateur évalue combien on utilise de ressources naturelles comme les métaux ou les minéraux (par exemple, le cuivre, le fer, ou le sable) pour produire un matériau.
- **Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles** : Cet indicateur mesure la consommation de ressources non renouvelables, en particulier les combustibles fossiles utilisés tout au long de la vie du matériau.
- **Besoin en eau** : Cet indicateur mesure la quantité totale d'eau utilisée pour produire, transporter, utiliser et éliminer un matériau.

Indicateur par impact	Mur fictif typique en Belgique	Mur fictif en terre crue avec ossature bois	Mur fictif en terre crue avec du liège	Mur fictif en pierre (moellons)	Unité de calcul
Changement climatique - biogénique	0.82	0.64	0.55	1.2	kg de CO ₂ équiv.
Changement climatique	132	88	101	117	kg de CO ₂ équiv.
Épuisement des ressources abiotiques - minéraux et métaux	0.00021	0.0001	0.000091	0.00007	kg de SB équiv.
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	1204	815	1054	1269	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Besoin en eau	41	8.9	22	23	m ³ de privation équiv. dans le monde
Meilleur résultat			Deuxième meilleur résultat		

Figure 176 : Tableau d'analyse des parois TOTEM généré avec l'outil TOTEM.

Source : Maton, I. (2025). Conception écoresponsable, comment les matériaux biosourcés et géosourcés réactivent l'intelligence constructive en architecture ? Analyse de trois matériaux structurels : le bambou, la terre crue et la pierre massive. TFE en architecture, ULG.

Ce tableau met en évidence la performance du **mur en terre crue avec ossature bois**, qui se démarque sur plusieurs critères essentiels. Il offre des avantages en matière de réduction des émissions de CO₂, de préservation des ressources naturelles et de faible consommation d'eau. De manière générale, **les deux meilleures performances environnementales** sont attribuées **aux parois en terre crue**. Toutefois, la seconde paroi, bien qu'elle soit également en terre, obtient un score légèrement moins favorable en raison de l'intégration du liège, un matériau biosourcé dont la transformation génère un impact environnemental plus élevé.

En effet, ce mur émet seulement **88 kg de CO₂ équivalents**, soit une valeur bien inférieure à celle des matériaux traditionnels, comme le mur fictif typique en Belgique (132 kg de CO₂ équiv.). Cette différence démontre que l'empreinte carbone des matériaux naturels est considérablement plus faible, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique.

De plus, la **terre** est un matériau renouvelable et abondant, et le mur en terre crue avec ossature bois consomme **seulement 8,9 m³** de privation équiv. dans le monde, bien moins que le mur fictif belge (41 m³ m³ de privation équiv. dans le monde). Cette faible consommation d'eau souligne l'impact positif de ces matériaux sur la gestion des ressources en eau.

Les matériaux naturels, tels que la terre crue, se distinguent par leur capacité à être recyclés ou réutilisés, contrairement à des matériaux plus conventionnels comme le béton, qui génèrent une quantité importante de déchets en fin de vie. La terre crue possède une grande plasticité qui lui confère un caractère entièrement réversible : elle peut être réemployée sans nécessiter de transformation complexe, à travers un processus simple, rapide et peu énergivore. Un autre avantage majeur de la terre crue réside dans **sa grande disponibilité** : elle peut être extraite directement sur site, à proximité, ou provenir de terres issues de déchets, ce qui réduit considérablement les besoins en transport et, par conséquent, son impact environnemental.

Comparées à une construction traditionnelle en Belgique, les **deux parois en terre fictive** se distinguent par des résultats plus avantageux. La **paroi en pierre fictive**, en revanche, affiche des valeurs similaires à celles du mur traditionnel, ce qui est probablement dû à l'utilisation de **mortier de ciment** dans sa composition.

En résumé, l'utilisation de matériaux comme la **terre crue** ou la **pierre** permet, à différentes échelles, de réduire l'empreinte écologique des constructions. Elle limite l'impact environnemental et favorise un modèle de construction plus durable, respectueux des ressources naturelles. Ces résultats soulignent l'importance de privilégier des matériaux écologiques afin de minimiser les impacts environnementaux et de promouvoir un développement durable.

Il convient de rappeler que ces valeurs proviennent d'un outil où toutes les possibilités ne sont pas données et que donc, pour certaines parois, cela peut fausser les résultats.



Chapitre 6 :

Conclusion de la partie III

En conclusion, cette troisième et dernière partie de l'étude met en évidence **l'importance d'une approche intégrée et holistique dans la conception architecturale durable**. À travers l'analyse comparative du bambou, de la terre crue et de la pierre massive, nous avons pu apprécier les caractéristiques distinctes de chacun de ces matériaux, tout en mettant en lumière leurs complémentarités et leurs synergies possibles.

Loin de réduire l'architecture durable à un simple choix de matériaux, cette réflexion démontre qu'une **composition réfléchie, fondée sur l'intelligence constructive, est essentielle**. Il s'agit d'utiliser le bon matériau, au bon endroit, en exploitant ses qualités intrinsèques tout en respectant les contraintes environnementales et structurelles du projet. La pierre massive, par sa résistance à l'humidité et à la compression, s'impose comme un matériau idéal pour les fondations et les soubassements. La terre crue, sensible à l'humidité mais dotée d'une excellente inertie thermique, trouve toute sa pertinence dans la construction de murs porteurs, tandis que le bambou, résistant à la traction et léger, s'avère particulièrement adapté aux structures hautes telles que les charpentes.

L'analyse de leur disponibilité et de **leur potentiel en Belgique** révèle également des **réalités contrastées** : si la terre crue et la pierre massive bénéficient d'une forte tradition locale et d'une accessibilité plus ou moins immédiate, le bambou reste une ressource émergente, confrontée à des défis techniques et climatiques qu'il est nécessaire d'anticiper. Ces constats permettent de déconstruire certaines idées reçues et d'ouvrir la voie à une architecture plus résiliente, locale et adaptée aux enjeux contemporains.

En abordant des questions telles que la **circularité des matériaux**, leur transformation et leur capacité d'adaptation au contexte local, cette étude affirme que la combinaison intelligente de matériaux biosourcés et géosourcés constitue une réponse pertinente aux défis environnementaux actuels. Elle montre qu'une **architecture écoresponsable**, performante et durable est non seulement possible, mais indispensable **pour construire l'avenir**.

L'intelligence constructive, principe central de cette étude, apparaît ainsi comme **un levier incontournable pour l'architecture de demain** : une architecture fondée sur la complémentarité des matériaux, leur juste utilisation et leur intégration harmonieuse dans des projets à la fois techniques, esthétiques et durables.

CONCLUSION FINALE

Ce travail avait pour objectif d'explorer comment des matériaux naturels tels que le bambou, la terre crue et la pierre massive peuvent constituer des alternatives durables aux matériaux industriels dominants dans le domaine de la construction et réactiver l'intelligence constructive en architecture. À travers une approche comparative, ce travail visait à mettre en lumière les complémentarités possibles entre ces matériaux, à interroger les conditions de leur mise en œuvre contemporaine, et à démontrer que leur usage réfléchi permet d'ouvrir la voie à une architecture plus résiliente, locale et écoresponsable. Pour répondre à cette problématique, une **méthodologie en trois volets** a été adoptée.

La **première partie** a été consacrée à une **analyse approfondie des propriétés physiques, mécaniques et environnementales** des trois matériaux étudiés. À travers l'étude de leurs caractéristiques intrinsèques (résistance, densité, comportement thermique, inertie, durabilité...), mais aussi des **modalités de mise en œuvre, types d'assemblages, cycles de vie** et **services écosystémiques**, cette partie a permis de dresser un **panorama technique et écologique complet**. Le **bambou** s'y est révélé comme un matériau à croissance rapide, **extrêmement léger, flexible** et mécaniquement performant, dont la culture capte efficacement le carbone et dont les propriétés structurelles rivalisent avec certains bois ou aciers. La **terre crue**, quant à elle, se distingue par son **comportement hygrométrique**, sa **régulation thermique**, et son potentiel pour des constructions à très faible empreinte environnementale. Enfin, la **pierre massive** incarne la **solidité, la durabilité et sa régulation thermique**. En somme, cette première partie démontre que chacun de ces matériaux, bien qu'issu d'une tradition vernaculaire ou naturelle, présente des **qualités structurelles, environnementales et culturelles** essentielles pour **concevoir une architecture écoresponsable** dans le contexte du XXI^e siècle. Elle pose ainsi les fondations théoriques et techniques nécessaires pour aborder les dimensions constructives et contextuelles étudiées dans la suite du TFE.

La **seconde partie** a exploré la mise en œuvre concrète de ces trois matériaux à travers une série de projets architecturaux. Ces études de cas ont permis **d'illustrer la diversité des contextes** dans lesquels ces matériaux trouvent leur pertinence : climats tropicaux pour le bambou, climat méditerranéen pour la terre crue, environnements variés pour la pierre massive. Chaque projet a mis en lumière la capacité de ces matériaux à répondre aux enjeux contemporains de durabilité, notamment par leur faible empreinte écologique, leur disponibilité locale, leur potentiel de réversibilité ou encore la valorisation de techniques constructives issues des savoir-faire traditionnels. Le bambou, utilisé principalement pour ses qualités mécaniques et sa légèreté, démontre sa pertinence dans des structures évolutives et démontables. La terre crue, matériau ancré dans l'histoire humaine, s'impose aujourd'hui comme un choix durable, performant thermiquement, et riche de sens lorsqu'elle est mise en œuvre avec les communautés locales. Quant à la pierre massive, elle allie solidité, durabilité et esthétique, et permet une architecture pérenne et ancrée dans son territoire, tout en étant compatible avec les exigences contemporaines en matière de confort et d'efficacité. Cette exploration vient ainsi prolonger les fondements établis dans la première partie, qui avait permis de comparer les propriétés physiques, mécaniques, environnementales et constructives de ces matériaux. Ensemble, ces deux volets soulignent l'importance de réhabiliter les ressources naturelles et locales dans la construction, non pas comme une régression, mais comme une avancée nécessaire vers une architecture plus résiliente, contextuelle et responsable.

La troisième et dernière partie de cette étude a mis en **perspective l'ensemble des données recueillies** en les confrontant aux enjeux environnementaux propres **au contexte Belge**. À travers une analyse comparative du bambou, de la terre crue et de la pierre massive, j'ai pu identifier les caractéristiques distinctes de chaque matériau, tout en soulignant **leurs complémentarités et synergies** possibles. Loin de se limiter à un simple choix de matériaux, cette réflexion a révélé qu'une composition réfléchie et une utilisation appropriée de chaque matériau sont essentielles pour garantir une architecture durable et performante. La pierre massive, avec sa résistance à l'humidité et à la compression, se positionne comme un matériau idéal pour les fondations et les

soubassements, là où sa durabilité fait toute la différence. La terre crue, tout en étant sensible à l'humidité, se distingue par ses excellentes propriétés thermiques, rendant son utilisation particulièrement pertinente pour la construction de murs porteurs. Enfin, le bambou, léger et résistant à la traction, s'avère être un choix pertinent pour les structures hautes comme les charpentes, permettant de concilier solidité et flexibilité. L'analyse de la disponibilité de ces matériaux en Belgique a également révélé des disparités notables. Tandis que la terre crue et la pierre massive bénéficient d'une accessibilité relativement simple, le bambou demeure une ressource émergente, confrontée à des défis techniques et climatiques qu'il convient de surmonter. Ces constats ouvrent la voie à une remise en question des idées reçues et à une exploration de nouvelles solutions adaptées aux réalités contemporaines, permettant ainsi d'envisager une architecture plus résiliente, locale et en phase avec les enjeux environnementaux actuels. Cette étude a aussi soulevé des questions essentielles telles que la circularité des matériaux et leur transformation. Elle a démontré que la combinaison intelligente de matériaux biosourcés et géosourcés est une réponse particulièrement pertinente face aux défis écologiques du présent. Une architecture écoresponsable, fondée sur la complémentarité des matériaux, leur juste utilisation et leur intégration harmonieuse dans des projets techniques et esthétiques, apparaît non seulement comme un objectif possible, mais indispensable pour façonner un avenir plus durable.

En conclusion, ce travail a eu pour objectif de démontrer que l'architecture durable ne réside pas uniquement dans le choix de matériaux écologiques, mais dans leur utilisation éclairée et leur intégration réfléchie dans le cadre spécifique de chaque projet. Le bambou, la terre crue et la pierre massive, bien que souvent considérés comme des matériaux non compétants, révèlent aujourd'hui tout leur potentiel pour répondre aux défis contemporains de la construction durable. Leur capacité à s'adapter aux exigences environnementales, à minimiser l'empreinte écologique et à valoriser les ressources locales en fait des alternatives pertinentes et performantes aux matériaux industriels dominants. Chaque matériau possède des qualités qui, lorsqu'elles sont combinées de manière appropriée, permettent de concevoir des projets à la fois techniquement performants, esthétiques et respectueux de l'environnement. L'intelligence constructive, concept central de cette étude, s'affirme ainsi comme la clé pour une architecture durable, permettant d'exploiter les points forts de chaque matériau tout en optimisant leurs interactions au sein d'une structure. Enfin, la complémentarité entre matériaux biosourcés et géosourcés représente une voie prometteuse pour le futur de l'architecture durable. En favorisant leur combinaison, nous pouvons ouvrir la voie à une construction écoresponsable qui ne soit pas simplement un retour aux sources, mais un acte innovant permettant de répondre aux défis environnementaux.

Cependant, certaines limites ont entravé la portée de ce travail. Le temps imparti à la réalisation du TFE n'a pas permis d'approfondir certaines analyses. De plus, la disponibilité limitée des documents techniques, ainsi que le manque de réactivité de certains professionnels contactés, ont freiné la collecte d'informations et de documents.

Comme le rappelle Anna Heringer dans *Form Follows Love* : « Si nous attendons que toutes les exigences réglementaires soient en faveur d'une architecture écologique et économe en ressources, il sera trop tard ! » (Heringer & Gauzin-Müller, 2024, p.109). Cette citation résonne comme un appel à agir sans attendre. L'architecte, en tant qu'acteur engagé du changement, doit oser expérimenter, transmettre et bâtir autrement. Ce TFE se veut donc une invitation à cette transformation.

Perspectives d'évolution du sujet

Si cette recherche devait être poursuivie, plusieurs axes d'approfondissement pourraient être envisagés afin de mieux comprendre le potentiel du bambou, de la terre crue et de la pierre massive dans le secteur de la construction. Parmi ces pistes, on pourrait notamment explorer :

Rencontres avec des architectes engagés dans une approche durable :

Le manque de temps et de disponibilité a constitué un frein à l'exploration approfondie de témoignages et retours d'expérience. Il serait pertinent d'aller à la rencontre d'architectes ayant intégré le bambou, la terre crue et la pierre massive dans leurs projets. Leurs retours permettraient de mieux comprendre les motivations, les défis et les solutions mises en place pour intégrer ces matériaux dans des constructions contemporaines et durables.

Analyse approfondie de la durabilité, de l'entretien et du vieillissement des matériaux :

Un axe de recherche essentiel consisterait à étudier plus en détail la longévité des trois matériaux, notamment face aux conditions climatiques belges. Il serait intéressant d'analyser leur comportement à long terme, leur résistance aux intempéries, les techniques d'entretien nécessaires et les stratégies possibles pour améliorer leur durabilité sans altérer leurs qualités écologiques et esthétiques.

Mise en lumière des professionnels et des acteurs locaux :

L'identification et la mise en avant de professionnels et artisans travaillant avec ces matériaux en Belgique offrirait une vision concrète des freins et opportunités rencontrés sur le terrain. En organisant des discussions avec ces acteurs, il serait possible de mieux comprendre les limites techniques, économiques et réglementaires qui freinent l'adoption de la terre crue et de la pierre massive, tout en valorisant les initiatives qui ont réussi à surmonter ces obstacles. Le bambou quant à lui, cela sera plus compliqué dans un premier temps.

Conception d'esquisses de constructions types adaptées au contexte belge :

Afin de clarifier les enjeux techniques et réglementaires, il serait intéressant de concevoir des esquisses de constructions types pour chaque matériau en Belgique. Cela permettrait de mettre en évidence :

- Les contraintes spécifiques à chaque matériau.
- Les éléments à anticiper lors de la mise en œuvre.
- Les solutions architecturales et techniques pour assurer la faisabilité de ces constructions dans un contexte normatif (si il y en a) et climatique.

D'autres pistes pourraient également être envisagées, afin de renforcer la pertinence et l'applicabilité des matériaux étudiés dans la construction durable, tout en affinant la compréhension des défis à surmonter et des opportunités à exploiter.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Méthodologie de recherche.....	12
Figure 2 : Description des différentes parties du bambou.....	21
Figure 3 : Techniques d'assemblages de bambous avec des nœuds et ligatures.....	26
Figure 4 : Corde végétale pour assembler le Bambou.....	26
Figure 5 : Techniques d'assemblages de bambou à entaille croisée.....	26
Figure 6 : Exemple d'assemblage de bambou cranté et percé.....	26
Figure 7 : Exemple d'assemblage de bambous par enfourchement.....	26
Figure 8 : Assemblage de bambous par emboîtement ou insertion.....	26
Figure 9 : Assemblage de bambous solidifié avec un brelâge.....	26
Figure 10 : Tableau récapitulatif des assemblages traditionnels en bambou.....	26
Figure 11 : Assemblage de bambous par boulons et vis.....	27
Figure 12 : Assemblage de bambous par plaques de jonction en acier inoxydable.....	27
Figure 13 : Assemblage de bambous par connecteurs métalliques.....	27
Figure 14 : Design by Adan Piza.....	27
Figure 15 : Assemblage de bambous par matière injectée.....	27
Figure 16 : Tableau récapitulatif des assemblages modernes en bambou.....	27
Figure 17 : Assemblage de bambous au sol par connecteurs métalliques.....	28
Figure 18 : Assemblage de bambous en ancrage au sol.....	28
Figure 19 : Tableau récapitulatif des assemblages au sol en bambou.....	28
Figure 20 : Tableau de réversibilité des assemblages en bambou.....	30
Figure 21 : Projet Housing NOW de l'architecte Blue Temple.....	31
Figure 22 : Tableau de synthèse sur les propriétés du bambou.....	32
Figure 23 : Illustration des composants de la terre.....	35
Figure 24 : Extraction de la terre pour le projet DESI d'Anna Heringer au Bangladesh.....	36
Figure 25 : Tableau de la résistance à la compression de la terre crue par rapport à d'autres matériaux.....	38
Figure 26 : Comparaison des masses volumiques des différents types de terre crue et de matériaux conventionnels.....	39
Figure 27 : Illustration de la mise en œuvre du pisé.....	40
Figure 28 : Outil pour la mise en œuvre du pisé.....	40
Figure 29: Illustration de la mise en œuvre de l'adobe.....	40
Figure 30 : Moule pour la mise en œuvre de l'adobe.....	40
Figure 31 : Illustration de la mise en œuvre de la BTC.....	41
Figure 32 : Illustration de la mise en œuvre de la bauge.....	41
Figure 33 : Outil bêche pour la mise en œuvre de la bauge.....	41
Figure 34 : Tableau explicite des différentes techniques en terre crue.....	41
Figure 35 : Normes et réglementations de la terre crue.....	43
Figure 36 : Tableau de synthèse sur les propriétés de la terre crue.....	44
Figure 37 : Standardisation des blocs de pierre.....	50
Figure 38 : Schéma d'assemblage en pierre taillée.....	52
Figure 39 : Schéma d'assemblage en pierre sèche.....	52
Figure 40 : Schéma d'assemblage en maçonnerie chaînée.....	52
Figure 41 : Tableau de synthèse sur les mises en œuvre de la pierre massive.....	52
Figure 42 : Tableau de synthèse sur les propriétés de la pierre massive.....	54
Figure 43 : Plan de site du Northeast Bamboo Pavillon.....	61
Figure 44 : Vue extérieure du Northeast Bamboo Pavillon.....	62
Figure 45 : Vue du toit du Northeast Bamboo Pavillon.....	62

Figure 46 : Vue globale du Northeast Bamboo Pavilion.....	62
Figure 47 : Schéma des jonctions des bambous avec des boulons du projet NorthEast Bamboo Pavilion de atArchitecture.....	63
Figure 48 : Photo de la structure en bambou.....	63
Figure 49 : Photo d'une jonction mécanique de bambous du projet NorthEast Bamboo Pavilion de atArchitecture.....	63
Figure 50 : Détail d'assemblage en bambou du Northeast Bamboo Pavilion.....	64
Figure 51: Vue extérieure du Anandaloy Center.....	66
Figure 52 : Projet Anandaloy vue de côté d'Anna Heringer.....	67
Figure 53 : Projet Anandaloy d'Anna Heringer.....	67
Figure 54 : Projet Anandaloy vu de l'intérieur d'Anna Heringer.....	67
Figure 55 : Projet Anandaloy vue du RDC d'Anna Heringer.....	67
Figure 56 : Zoom explicatif sur les jonctions en bambou du projet Anandaloy d'Anna Heringer.....	68
Figure 57 : Zoom sur un côté du projet Anandaloy d'Anna Heringer.....	69
Figure 58 : Plan directeur de Rudrapur avec le projet Desi Training Center.....	71
Figure 59 : Vue intérieure de l'étage du projet Desi Training Center d'Anna Heringer.....	72
Figure 60: Projet Desi Training Center vue de l'intérieur d'Anna Heringer.....	72
Figure 61: Projet Desi Training Center d'Anna Heringer.....	72
Figure 62 : Plan et coupe détaillée du projet Desi Training Center d'Anna Heringer.....	74
Figure 63 : Contemplation Bamboo Pavillon à Arles de Simon Vélez.....	76
Figure 64 : Contemplation Bamboo Pavillon.....	77
Figure 65 : Contemplation Bamboo Pavillon, photo des parois.....	77
Figure 66 : Contemplation Bamboo Pavillon à Arles vue de l'intérieur de Simon Vélez.....	77
Figure 67 : La structure du Contemplation Bamboo Pavillon de Simon Vélez.....	78
Figure 68 : Photo des jonctions métalliques entre les bambous.....	79
Figure 69 : Croquis de Simon Velez pour le pavillon arlésien.....	79
Figure 70 : Plan d'implantation du projet Bamboo Sports Hall for Panyaden International School.....	81
Figure 71 : Vue aérienne du projet <i>Bamboo Sports Hall for Panyaden International School</i>	82
Figure 72 : Photo du projet Bamboo Sports Hall for Panyaden International School.....	82
Figure 73 : Photo de l'intérieur du projet Bamboo Sports Hall for Panyaden International School.....	82
Figure 74 : Photo d'un ferme préfabriqué.....	83
Figure 75 : Photo d'une jonction de bambous réalisée par ligature.....	84
Figure 76 : Section dans le gymnase de la Panyaden School.....	84
Figure 77 : Tableau récapitulatif des projets en bambou.....	86
Figure 78 : Bahay Kubo.....	88
Figure 79 : Maisons flottantes traditionnelles en Birmanie.....	89
Figure 80 : Tableau synthèse des projets vernaculaires en bambou.....	90
Figure 81 : Plan directeur de Rudrapur avec le projet Meti Handmade School.....	93
Figure 82 : Projet Meti Handmade School photo sur le côté d'Anna Heringer.....	94
Figure 83 : Photo de l'intérieur du projet Meti Handmade School.....	94
Figure 84 : Projet Meti Handmade School d'Anna Heringer.....	94
Figure 85 : Élévation ouest Projet Meti Handmade School d'Anna Heringer.....	95
Figure 86 : Section du Projet Meti Handmade School d'Anna Heringer.....	96
Figure 87 : Plan d'implantation de l'école primaire Gando de Francis Kéré.....	98
Figure 88 : Vue du côté de l'école primaire de Gando.....	99
Figure 89 : École primaire de Gando.....	99

Figure 90 : Projet Gando Primary School de Francis Kéré.....	100
Figure 91 : Photo de la toiture de l'école de Gando.....	100
Figure 92 : Intérieur de l'école primaire de Gando.....	100
Figure 93 : Coupe détail du projet <i>Gando Primary School</i>	100
Figure 94 : Axonométrie éclatée de l'école primaire de Gando.....	101
Figure 95 : Plan de situation de la Haus Rauch.....	103
Figure 96 : Photos de l'intérieur du projet Haus Rauch.....	104
Figure 97 : Photo du projet The House Rauch.....	104
Figure 98 : La façade du projet Haus Rauch.....	105
Figure 99 : Battre Bühler Haus Rauch.....	105
Figure 100 : Axonométrie des différentes couches du mur du projet Haus Rauch.....	106
Figure 101 : Plan de situation de la crèche de 24 berceaux au Palais de l'Alma.....	108
Figure 102 : Photo de l'ensemble de la crèche.....	109
Figure 103 : Photo de l'entrée de la crèche.....	109
Figure 104 : Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma.....	109
Figure 105 : Dispositif de coffrage pour la mise en œuvre du pisé.....	110
Figure 106 : Terre utilisée pour le projet de la crèche du Palais de l'Alma.....	110
Figure 107 : Photo du côté de la crèche.....	110
Figure 108 : Détails techniques des parois de la crèche.....	111
Figure 109 : Plan d'implantation du projet CEM Kamanar de DAWOffice.....	113
Figure 110 : Projet CEM Kamanar de DAWOffice.....	114
Figure 111 : Vue de l'intérieur du projet CEM Kamanar.....	114
Figure 112 : Photo du projet CEM Kamanar de DAWOffice.....	114
Figure 113 : Photo de la façade du projet CEM Kamanar.....	115
Figure 114 : Détail constructif du projet CEM Kamanar.....	116
Figure 115 : Tableau récapitulatif des projets en terre crue.....	118
Figure 116 : Les immeubles des villes de Sanaa au Yémen.....	119
Figure 117 : La ville de Ghadamès en Libye.....	120
Figure 118 : Tableau synthèse des projets vernaculaire en terre crue.....	121
Figure 119 : Plan de masse du projet Immeuble mixte signé Gilles Perraudin.....	124
Figure 120 : Photo des coursives Immeuble mixte en pierre massive à Caluire.....	125
Figure 121 : Photo de l'arrière de l'immeuble mixte.....	125
Figure 122 : Photo du projet de l'immeuble mixte signé Gilles Perraudin.....	125
Figure 123 : Voûte en pierre massive.....	126
Figure 124 : Blocs de pierre taillée.....	126
Figure 125 : Coupe longitudinale du projet de l'immeuble mixte signé Gilles Perraudin.....	127
Figure 126 : Plan de situation du projet 68 logements collectifs en pierre massive.....	129
Figure 127 : Photo de l'intérieur d'un appartement.....	130
Figure 128 : Les escaliers du projet 68 logements collectifs en pierre massive.....	130
Figure 129 : Projet 68 logements collectifs en pierre massive.....	130
Figure 130 : Vue prise pendant le chantier du projet.....	131
Figure 131 : Blocs taillés et numérotés.....	131
Figure 132 : Coupe longitudinale du projet 68 logements collectifs en pierre massive.....	132
Figure 133 : Plan d'implantation du projet Coulouvrenière.....	134
Figure 134 : Projet Coulouvrenière de L'Atelier Archiplein.....	135
Figure 135 : L'intérieur d'un appartement du projet Coulouvrenière de L'Atelier Archiplein.....	135

Figure 136 : Projet Coulouvrenière de L'Atelier Archiplein au bord du Rhône.....	135
Figure 137 : Vues prises pendant le chantier du projet Coulouvrenière.....	136
Figure 138 : Détails constructifs du projet Coulouvrenière.....	137
Figure 139 : Plan d'implantation du projet du Groupe scolaire à Opio de Teissier Portal.....	139
Figure 140 : Groupe scolaire à Opio de Teissier Portal.....	140
Figure 141 : La cour maternelle du projet.....	140
Figure 142 : Groupe scolaire à Opio.....	140
Figure 143 : Projet du Groupe scolaire à Opio en construction.....	141
Figure 144 : Coupe longitudinale du projet du Groupe scolaire à Opio.....	142
Figure 145 : Plan de situation du projet Le chai Delas,Tain l'hermitage.....	144
Figure 146 : Projet Le chai Delas,Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt, vue de l'intérieur.....	145
Figure 147 : Projet Le chai Delas,Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt, vue du toit.....	145
Figure 148 : Le chai Delas,Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt.....	145
Figure 149 : Vues prises lors du chantier du projet Le chai Delas,Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt.....	146
Figure 150 : Coupe longitudinale du projet Le chai Delas,Tain l'hermitage de Carl Fredrik Svenstedt.....	147
Figure 151 : Tableau récapitulatif des projets en pierre massive.....	149
Figure 152 : Masia.....	151
Figure 153 : Le mas arlésien, habitat typique de Provence.....	152
Figure 154 : Tableau synthèse des projets vernaculaires en pierre massive.....	153
Figure 155 : Tableau comparatif des propriétés du bambou, de la terre crue et de la pierre massive.....	159
Figure 156 : Tableau comparatif des usages en construction du bambou, de la terre crue et de la pierre massive.....	161
Figure 157 : Schéma synthétique des possibilités d'usage du bambou, de la terre crue et de la pierre massive.....	163
Figure 158 : Vue générale du projet <i>Bamboo Hostels</i> d'Anna Heringer.....	164
Figure 159 : Vue extérieure du projet <i>Bamboo Hostels</i> conçu par Anna Heringer.....	164
Figure 160 : Dessins techniques du projet <i>Bamboo Hostels</i> d'Anna Heringer.....	166
Figure 161 : Vue de la structure en bambou du projet <i>Bamboo Hostels</i> d'Anna Heringer.....	167
Figure 162 : Phase de construction du projet <i>Bamboo Hostels</i> d'Anna Heringer.....	167
Figure 163 : Schéma explicatif de la dalle de plancher du projet <i>Desi Training Center</i> d'Anna Heringer.....	168
Figure 164 : Schéma d'un mur en bambou.....	170
Figure 165 : Schéma d'un mur en BTC.....	170
Figure 166 : Schéma d'un mur en pierre massive.....	170
Figure 167 : Calcul des quantités de matériaux nécessaires pour 1 m ² de mur.....	170
Figure 168 : Tableau comparatif des portées structurelles des trois matériaux.....	171
Figure 169 : Le Pont du Gard, exemple de construction massive en pierre.....	171
Figure 170 : Tableau d'analyse sur l'applicabilité du bambou, de la terre crue et de la pierre massive en Belgique.....	173
Figure 171 : Tableau d'analyse de la circularité du bambou, de la terre crue et de la pierre massive.....	175
Figure 172 : Mur fictif typique en Belgique, généré avec l'outil TOTEM.....	177
Figure 173 : Mur fictif en terre crue avec ossature bois, généré avec l'outil TOTEM.....	177
Figure 174 : Mur fictif en terre crue avec isolation en liège, généré avec l'outil TOTEM.....	178
Figure 175 : Mur fictif en pierre massive, généré avec l'outil TOTEM.....	178
Figure 176 : Tableau d'analyse des parois générées avec l'outil TOTEM.....	179

LISTE DES CREDITS

© pandambambou.com :.....	pp.24
© Suryan // Dang :	pp.60
© Studio Cardenas Conscious Design :.....	pp.61
© Kurt Hoerbst :.....	pp.64,65,70,92
© Naquib Hossain :.....	pp.70
© B.K.S. Inan :.....	pp.70
© Jan Dyver :.....	pp.74,75
© Xavier de Jauréguiberry :.....	pp.75,76,77
© Alberto Cosi :.....	pp.80,82
© Markus Roselieb :.....	pp.88, 81
© Siméon Duchoud :.....	pp.97,98
© Erik Jan Ouwerkerk :.....	pp.97
© Kéré Architecture :.....	pp.98
© Beat Bühler :	pp.102
© 11h45 – Florent Michel :	pp.107, 123
© Claudia Mauriño :	pp.112
© Noemí de la Peña :.....	pp.113
© Fiona Dunlop :	pp.118
© AAP :	pp.125
© Leo Fabrizio :	pp.128, 133, 134
© Atelier Archiplein :.....	pp.130
© Milène Servelle :	pp.138
© Dan Glasser :	pp.143
© Jenny Ji :.....	pp.162, 165

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. CRAterre Editions.
- Gauzin-Müller, D., Fontaine, L., & Sémon, P. (avec Vissac, A., Kostezer, D., Pittau, F., & Habert, G.). (2019). *Architecture en fibres végétales d'aujourd'hui*. Museo Editions.
- Gnanaharan, R. (2002). *Preservative Treatment of Bamboo and Bamboo Products*. Kerala Forest Research Institute.
- Heringer, A., & Gauzin-Müller, D. (2024). *Form Follows Love (Édition française) : Une Intuition Construite - Du Bangladesh À l'Europe Et Au-Delà*.
- Heringer, A., Howe, L. B., & Rauch, M. (2022). *Upscaling earth : Material, process, catalyst* (2nd ed.). gta Verlag.
- Hidalgo, O. L. (2018). *Manuel de construction en bambou*. Édition de Terran.
- Houben, H., Guillaud, H., & Dayre, M. (2006). *Traité de construction en terre*. Parenthèses Editions.
- Jolliet, O., Crettaz, P., & Saadé-Sbeih, M. (2010). *Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan* (2nd ed.). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Köhl, M., & Liese, W. (2015). *Bamboo: the plant and its uses*. Springer Verlag.
- Lambertie, R. (1962). *L'industrie de la pierre et du marbre* [Livre en ligne]. Dans *Presses Universitaires de France eBooks*. Consulté le 18 décembre 2024, à l'adresse : <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA56273384>
- Le Dréan, M., & Kuratli, J. (2022). *La pierre banale—Logements collectifs en pierre massive, région parisienne, 1948-1973* (EPFL PRESS).
- Madec, P. (2021). *Mieux avec moins : Architecture et frugalité pour la paix*. Éditions Terre urbaine.
- Méral, P., & Pesche, D. (2016). *Les services écosystémiques : Repenser les relations nature et société* [Livre en ligne]. Éditions Quæ. <https://books.openedition.org/quæ/26482>
- Minke, G. (2009). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser.
- Minke, G. (2023). *Building with bamboo*. Birkhäuser.
- Pressacco, B., & Barrault, T. (2018). *Pierre : Révéler la ressource, explorer le matériau*. Pavillon de l'Arsenal.
- Trachte, S., & Dorothée, S. (2023). *Isolants thermiques en rénovation, Réaliser un choix équilibré entre confort, performance énergétique, approche environnementale et gestion circulaire des ressources*. EPFL Press, Lausanne, Switzerland. ISBN : 978-2-88915-534-7.
- Van de Voorde, S., Bertels, I., & Wouters, I. (2015). Post-war building materials in housing in Brussels 1945–1975 / Naoorlogse bouwmaterialen in woningen in Brussel 1945–1975 / Matériaux de construction d'après-guerre dans l'habitation à Bruxelles 1945–1975 [Livre en ligne]. Vrije Universiteit Brussel. https://www.researchgate.net/publication/288825815_Post-war_building_materials_in_housing_in_Brussels_1945-1975_Naoorlogse_bouwmaterialen_in_woningen_in_Brussel_1945-1975_Materiaux_de_construction_d'apres-guerre_dans_l'habitation_a_Bruxelles_1945-1975

Articles et publications scientifiques

- Abdallah, M. R., Hassan, H. A., & Al-Olofi, A. A. (2020). Traditional Yemeni Architecture and Its Impact on Energy Efficiency. *International Journal Of Engineering Research And Technology*, 13(8), 2014. <https://doi.org/10.37624/ijert/13.8.2020.2014-2022>
- Attia, A. S. (2020). Traditional multi-story house (Tower House) in Sana'a City, Yemen. An example of sustainable architecture. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.001>
- Attia, A. S. (2022). Learned Lessons from Traditional Architecture in Yemen-Towards Sustainable Architecture. *Planning*, 17(4), 1197-1204. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.170418>
- Belarbi, Y. E., Sawadogo, M., Poullain, P., Issaadi, N., Hamami, A. E. A., Bonnet, S., & Belarbi, R. (2022). Experimental Characterization of Raw Earth Properties for Modeling Their Hygrothermal Behavior. *Buildings*, 12(5), 648. <https://doi.org/10.3390/buildings12050648>
- Ben-zhi, Z., Mao-yi, F., Jin-zhong, X., Xiao-sheng, Y., & Zheng-cai, L. (2005). Ecological functions of bamboo forest: Research and Application. *Journal of Forestry Research*, 16(2), 143–147. <https://doi.org/10.1007/BF02857909>
- Binici, H., Aksogan, O., Bodur, M. N., Akca, E., & Kapur, S. (2007). Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. *Construction and Building Materials*, 21(4), 901–906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004>
- 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. *Natures Sciences Sociétés*. <https://doi.org/10.1051/nss/2024033>
- Borgi, R. (2012). Le site du Patrimoine mondial de Ghadamès (Libye).
- Bourbia, S., Kazeoui, H., & Belarbi, R. (2023). A review on recent research on bio-based building materials and their applications. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 12(2), 117-139. <https://doi.org/10.1007/s40243-023-00234-7>
- Bruno, A. W., Gallipoli, D., Perlot-Bascoules, C., Mendes, J., & Salmon, N. (2015). Briques de terre crue: Procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques. *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. <https://hal.science/hal-01167676>
- Didelon, V. (2020). Suivre la pierre. *Werk Bauen und Wohnen-Zurich*.
- Diep, T. M. H., Pignal, M. M., Gurgand, J., Dransfield, S., Dieu, N. K., Loan, N. T. B., Ly, N.-S., & Vignes, R. (2021). Chapitre 7 Collections de bambous du Viet Nam: Conservation, informatisation et valorisation pour le développement durable. *Biodiversité des écosystèmes intertropicaux: Connaissance, gestion durable et valorisation*, 113-123.
- Disén, K., & Clouston, P. L. (2013). Building with bamboo: A review of culm connection technology. *Journal of Green Building*, 8(4), 83-93. <https://doi.org/10.3992/jgb.8.4.83>
- Dixon, P. G., & Gibson, L. J. (2014). The structure and mechanics of Moso bamboo material. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(99), 20140321. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0321>
- Giada, G., Caponetto, R., & Nocera, F. (2019). Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability*, 11(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/su11195342>

- Gomes, M. I., Faria, P., & Gonçalves, T. D. (2019). Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness. *Construction and Building Materials*, 205, 213–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.222>
- Grodwohl, M. (2013). Architecture vernaculaire et paysages : Les enjeux culturels de la transition énergétique à Ungersheim (Alsace). *Journal des anthropologues*, 134-135, 221-241. <https://doi.org/10.4000/jda.4808>
- Hamot, L. (2017). Le bambou comme matériau de construction en Europe : une lubie temporaire ou un système viable pertinent en devenir ?
- Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9(3), 185-189. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00035-E](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00035-E)
- Horvath, J. (2012). *Bambou, bois des pauvres ou cadeau des dieux ?* MENS, 55. Consulté le 5 avril 2025, à l'adresse : https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Arbres-Bois-de-Rapport-Reforestation/FICHES_ARBRES/bambou/Bambou%20bois%20des%20pauvres%20ou%20cadeau%20des%20dieux.pdf
- Jiang, B., Tan, J., Wan, L., Wang, L., Lu, R., & Jiang, M. (2023). Hygrothermal parameters measurement and building performance study of modified rammed earth materials. *Energy and Buildings*, 299, 113609. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113609>
- Lenoir, D., & Gauzin-Müller, D. (2018). L'architecte, ambassadeur de la planète: *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, N° 90(2), 22-25. <https://doi.org/10.3917/re1.090.0022>
- Licordari, M. (2015). Reinforced concrete in the concept of heritage to be preserved. *e-Phaistos*, IV(2), 72-82. <https://doi.org/10.4000/ephaistos.792>
- Liese, W., & Köhl, M. (Éds.). (2015). *Bamboo: The Plant and its Uses* (Vol. 10). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- Losini, A. E., Grillet, A.-C., Vo, L., Dotelli, G., & Woloszyn, M. (2023). Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: From material to building scale. *Building and Environment*, 233, 110087. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110087>
- Lou, Z., Zheng, Z., Yan, N., Jiang, X., Zhang, X., Chen, S., Xu, R., Liu, C., & Xu, L. (2023). Modification and Application of Bamboo-Based Materials : A Review—Part II : Application of Bamboo-Based Materials. *Forests*, 14(11), 2266. <https://doi.org/10.3390/f14112266>
- Lu, S.-Y., Liu, C.-P., Hwang, L.-S., & Wang, C.-H. (2007). *Hydrological Characteristics of a Makino Bamboo Woodland in Central Taiwan*.
- Lumb, L. (1997). Panneaux de nattes de bambou : Un produit de remplacement du contreplaqué sans danger pour l'environnement. *CRDI Explore*.
- Mailly, D., Christanty, L., & Kimmins, J. P. (1997). 'Without bamboo, the land dies' : Nutrient cycling and biogeochemistry of a Javanese bamboo *talun-kebun* system. *Forest Ecology and Management*, 91(2), 155-173. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03893-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03893-5)
- Mango-Itulama, L. A., & Fagel, N. (2022). Study of parameters influencing the compressive strength of Compressed Earth Blocks. *Journal of Physics: Conference Series*, 2368(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2368/1/012004>

- Mercier, J. (1943). L'habitation rurale provençale. Le vent et le soleil. — Quelques remarques préliminaires. *Revue De Géographie Alpine*, 31(4), 525–533. <https://doi.org/10.3406/rga.1943.4394>
- Nurdiah, E. A. (2016). The Potential of Bamboo as Building Material in Organic Shaped Buildings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.004>
- Pereira, C., Caldeira, F., Ferreira, J. M. F., & Irle, M. A. (2012). Characterization of cement-bonded particleboards manufactured with maritime pine, blue gum and cork grown in Portugal. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1-3), 107-111. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0532-4>
- Piouceau, J., Panfili, F., Bois, G., Anastase, M., Feder, F., Morel, J., Arfi, V., & Dufossé, L. (2020). Bamboo Plantations for Phytoremediation of Pig Slurry : Plant Response and Nutrient Uptake. *Plants*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/plants9040522>
- Ren, K. B., & Kagi, D. A. (1995). Upgrading the durability of mud bricks by impregnation. *Building and Environment*, 30(3), 433-440. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)00056-X](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00056-X)
- Robinne, F. (1992). Habitat et parenté : essai d'analyse combinatoire entre différentes pratiques sociales des Birmans. *Techniques et culture*, (19), 103-137.
- Robinne, F. (1999). Formes architecturales et normes cosmiques en Birmanie. *Habitat et société. Actes des XIXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 22-24 octobre 1998*, 27-51.
- Shah, D. U., Sharma, B., & Ramage, M. H. (2018). Processing bamboo for structural composites : Influence of preservative treatments on surface and interface properties. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.05.009>
- Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, 81, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>
- Simons, A., Laborel-Préneron, A., Bertron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Roux, C., & Roques, C. (2015). Development of bio-based earth products for healthy and sustainable buildings : Characterization of microbiological, mechanical and hygrothermal properties. *Matériaux & Techniques*, 103(2), 206. <https://doi.org/10.1051/mattech/2015011>
- Sobreira, F. J. A. (2024). Francis Kéré: Arquitetura como lugar ameno nos trópicos ensolarados. *Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente*, 9(1), 10-28. <https://doi.org/10.21680/2448-296X.2024v9n1ID33150>
- Stouff, L. (1990). Le mas arlésien au XIVE et XVe siècles : à propos de l'habitat dispersé dans la Provence au bas Moyen Âge. *Annales Du Midi Revue Archéologique Historique Et Philologique De La France Méridionale*, 102(189), 161–171. <https://doi.org/10.3406/anami.1990.3311>
- Takagi, H., et al. (2007). Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites. *Advanced Composite Materials*, 16(4), 377-384. <https://doi.org/10.1163/156855107782325186>
- Tehami, M., & Anouche, K. (2017). Présences des préoccupations énergétiques dans l'approche conceptuelle de Fernand Pouillon dans les années 50 Cas d'étude de la cite Climat de France de Pouillon à Alger. *Journal Of Renewable Energies*, 20(1), 11-24. <https://doi.org/10.54966/jreen.v20i1.605>
- Villalon, A. (2002). The Philippines: The Filipino bahay kubo, where form does not necessarily follow function. *Monuments and Sites*, 5, 68-68.

Wang, J. S., et al. (2018). Thermal insulation performance of bamboo- and wood-based shear walls in light-frame buildings. *Energy and Buildings*, 168, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.017>

Xu, X., Xu, P., Zhu, J., Li, H., & Xiong, Z. (2022). Bamboo construction materials : Carbon storage and potential to reduce associated CO2 emissions. *Science of The Total Environment*, 814, 152697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152697>

Xu, Y., Huang, R., Zhou, B., & Ge, X. (2022). Fine-Root Decomposition and Nutrient Return in Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens* J.Houz.) Plantations in Southeast China. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.735359>

Sitographies

ArchDaily. (2010). *Handmade School / Anna Heringer + Eike Roswag*. Consulté le 28 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.archdaily.com/51664/handmade-school-anna-heringer-eike-roswag>

ArchDaily. (2016). *Gando Primary School / Kéré Architecture*. Consulté le 29 novembre 2024, à l'adresse : <https://www.archdaily.com/785955/primary-school-in-gando-kere-architecture>

ArchDaily. (2020-a). *Bamboo Hostels China / Studio Anna Heringer*. Consulté le 29 novembre 2024, à l'adresse : <https://www.archdaily.com/950733/bamboo-hostels-china-studio-anna-heringer>

ArchDaily. (2020-b). *Delas Frères Winery / Carl Fredrik Svenstedt Architect*. Consulté le 31 mars 2025, à l'adresse : <https://www.archdaily.com/933696/delas-freres-winery-carl-fredrik-svenstedt-architecte>

ArchDaily. (2020-c). *Desi Training Center / Studio Anna Heringer*. Consulté le 29 novembre 2024, à l'adresse : <https://www.archdaily.com/950704/desi-training-center-studio-anna-heringer>

ArchDaily. (2021-a). *Anandaloy Center / Studio Anna Heringer*. Consulté le 30 octobre 2024, à l'adresse <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>

ArchDaily. (2021-b). *Bamboo Sports Hall for Panyaden International School / Chiangmai Life Construction*. Consulté le 25 février 2025, à l'adresse : <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>

ArchDaily. (2024). *NorthEast Bamboo Pavilion / ATArchitecture*. Consulté le 28 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.archdaily.com/1012722/northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture/65c0e9a5f3424e66a469bf11-northeast-bamboo-pavilion-atarchitecture-plan-site>

Archello. (2023). *Atelier Archiplein réalise un immeuble de logements sociaux en pierre massive à Genève*. Consulté le 16 décembre 2024, à l'adresse : <https://archello.com/fr/news/atelier-archiplein-realise-un-immeuble-de-logements-sociaux-en-pierre-massive-a-geneve>

Archello. (s. d.). *CEM Kamanar - DAWOffice*. Consulté le 22 décembre 2024, à l'adresse : <https://archello.com/project/cem-kamanar>

archiDATUM. (s. d.). *Gando Primary School / Kéré Architecture*. Consulté le 22 avril 2025, à l'adresse : <https://archidatum.com/gallery?id=4004&node=4005>

Archiplein. (s. d.). Consulté le 16 décembre 2024, à l'adresse : <https://www.archiplein.com/>

Architecture Anna Heringer. (s. d.). *Anandaloy*. Consulté le 22 décembre 2024, à l'adresse : <http://www.anna-heringer.com/projects/anandaloy/>

Architecture Environnement. (s. d.). *Groupe scolaire à Opio*. Consulté le 17 octobre 2024, à l'adresse : <http://www.arch-environnement.fr/portfolio/items/groupe-scolaire-a-opio/>

Architonic. (s. d.). *Haus Rauch*. Consulté le 1 mai 2025, à l'adresse : <https://www.architonic.com/de/project/boltshauser-architekten-lehmhaus-rauch/5100620>

Arquitectura Viva. (2019). *Building DESI, Rudrapur – Anna Heringer*. Consulté le 24 février 2025, à l'adresse : <https://arquitecturaviva.com/works/building-desi-rudrapur>

Arquitectura Viva. (2022). *Kamanar Secondary School, Thionck Essyl - DAWOffice*. Consulté le 18 janvier 2025, à l'adresse : <https://arquitecturaviva.com/works/secondary-school-in-thionck-essyl>

Atelier Architecture Perraudin. (s. d.). *Atelier Architecture Perraudin*. Consulté le 16 décembre 2024, à l'adresse : <https://atelierperraudin.com/>

Bamboo Concept. (s.d.). *Comparaison des propriétés mécaniques du bambou : Guadua vs Moso*. Bamboo Concept. Consulté le 2 mars 2025, à l'adresse : <https://www.bamboo-concept.com/technique/manuels/>

Bambou en France. (s. d.). *Assemblage de bambous secs*. Bambou En France. Consulté le 5 septembre 2024, à l'adresse : <https://bambouenfrance.fr/assemblage-bambous/>

BARNES. (s. d.). *Mas provençal : Définition et caractéristiques du mas de Provence*. Consulté le 1 mai 2025, à l'adresse : <https://www.barnes-provence-littoral.com/fr/2022/les-mas-de-provence-1488-418-0-0>

BC architects & études & matériaux. (s. d.). *Accueil*. Consulté le 16 septembre 2024, à l'adresse : <https://bc-as.org/>

Bielema, C. (2018). *Le bambou dans la construction* [PDF]. Bamboo Concept. Consulté le 22 décembre 2024, à l'adresse : <https://www.bamboo-concept.com/wp-content/uploads/2020/12/Le-bambou-dans-la-construction.pdf>

Boltshauser Architekten. (s. d.). *Haus Rauch*. Consulté le 5 mars 2025, à l'adresse : <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>

Buildwise. (s. d.). *Normes et réglementations*. Consulté le 12 mars 2025, à l'adresse : <https://www.buildwise.be/fr/normes-et-reglementations/>

Carl Fredrik Svenstedt Architect. (s. d.). *Delas Frères Winery*. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse : <https://www.carlfredriksvenstedt.com/what/delas/>

Chroniques D'Architecture. (2021-b). *Immeuble mixte en pierre massive à Caluire signé Perraudin père et fils*. Consulté le 17 octobre 2024, à l'adresse : <https://chroniques-architecture.com/immeuble-mixte-pierre-massive-caluire-perraudin/>

Chroniques D'Architecture. (2023). *Une crèche au cœur du Palais de l'Alma signée Régis Roudil*. Consulté le 28 novembre 2024, à l'adresse : <https://chroniques-architecture.com/une-creche-au-coeur-du-palais-de-lalma-signee-regis-roudil/>

Chroniques D'Architecture. (2021-a). *À Plan-les-Ouates, deux immeubles en pierre signés Perraudin & Archiplein*. Consulté le 13 octobre 2024, à l'adresse : <https://chroniques-architecture.com/plan-les-ouates-deux-immeuble-en-pierre-signes-atelier-perraudin/>

Chroniques d'architecture. (2024). À Genève, un immeuble en pierre massive et bois par Archiplein. Consulté le 28 novembre 2024, à l'adresse : <https://chroniques-architecture.com/a-geneve-un-immeuble-en-pierre-massive-et-bois-par-archiplein/>

Conseil des Architectes d'Europe & Union Internationale des Architectes. (2023). *Une architecture et un environnement bâti de qualité : un objectif politique* [PDF]. Consulté le 29 octobre 2024, à l'adresse : https://www.ace-cae.eu/fileadmin/user_upload/Ace_UIA_Book_Fr_Screen.pdf

Conseil des Architectes D'Europe. (2024). *Il est temps d'agir : pour une architecture et un cadre de vie de qualité pour tous*. Consulté le 21 décembre 2024, à l'adresse : <https://ace-cae.eu/fr/advocacy/time-to-act-for-high-quality-architecture-and-living-environment-for-all/>

CTMNC & UNTEC. (2015). *Guide pratique de la pierre naturelle* [PDF]. Consulté le 15 février 2025, à l'adresse : https://www.dropbox.com/scl/fi/jg96cgo14lfgij8y3pvxr/Guide-pratique-de-la-pierre-naturelle_CTMNC-UNTEC_d-c-2015.pdf?rlkey=x23qg312ez8b74wfp7dcnxbxe&e=1&dl=0

DAWOffice. (s. d.). *CEM Kamanar*. DAWOffice. Consulté le 22 février 2025, à l'adresse : <https://dawoffice.com/cem-kamanar/>

Desjardins Inspirations & Conseils. (s. d.). Les bambous d'extérieur. Consulté le 23 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.desjardins-inspirations.fr/les-bambous-dexterieur/>

Dezeen. (2020). *Rippling robot-carved stone facade defines winery by Carl Fredrik Svenstedt Architect*. Consulté le 3 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.dezeen.com/2020/03/19/delas-freres-winery-carl-fredrik-svenstedt-architects-france/>

Didelon, V. (2023). *L'onde et la trame*. Espazium. Consulté le 29 novembre 2024, à l'adresse : <https://www.espazium.ch/fr/actualites/immeuble-pierre-bois-coulouvreniere-geneve>

Divisare. (s. d.-a). *Anna Heringer, DESI*. Consulté le 30 octobre 2024, à l'adresse : <https://divisare.com/projects/127081-anna-heringer-b-k-s-inan-desi>

Divisare. (s. d.-b). *atArchitecture, Suryan//Dang - NorthEast bamboo pavilion for Surajkund Craft Fair*. Consulté le 28 octobre 2024, à l'adresse : <https://divisare.com/projects/495608-atarchitecture-suryan-dang-northeast-bamboo-pavilion-for-surajkund-craft-fair>

Divisare. (s. d.-c). *Atelier Archiplein, Gilles Perraudin – Solid stone*. Consulté le 15 février 2025, à l'adresse : <https://divisare.com/projects/465690-atelier-archiplein-gilles-perraudin-adrien-buchet-leo-fabrizio-solid-stone>

Divisare. (s. d.-d). *Simón Vélez Architects - Contemplation bamboo pavilion*. Consulté le 28 octobre 2024, à l'adresse : <https://divisare.com/projects/390925-simon-velez-architects-xavier-de-jaureguiberry-contemplation-bamboo-pavilion>

Douce Cahute. (s. d.-a). *Hutte nipa : la maison traditionnelle des Philippines*. Douce Cahute. Consulté le 30 octobre 2024, à l'adresse : <https://maison-monde.com/hutte-nipa-maison-traditionnelle-philippines/>

Douce Cahute. (s. d.-b). *Les maisons à travers le Myanmar*. Consulté le 2 mai 2025, à l'adresse : <https://maison-monde.com/les-maisons-en-birmanie/>

Douce Cahute. (s. d.-c). *Les maisons traditionnelles de Sanaa*. Consulté le 25 février 2025, à l'adresse : <https://maison-monde.com/maisons-traditionnelles-de-sanaa/>

Douce Cahute. (s. d.). *Masia : maison rurale catalane*. Consulté le 1 mai 2025, à l'adresse : <https://maison-monde.com/maison-traditionnelle-catalane/>

Dunlop, F. (2022). *Ghadames : Is this the perfect desert town ?* BBC. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse : <https://www.bbc.com/travel/article/20221026-ghadames-is-this-the-perfect-desert-town>

Earth Architecture. (2024). *Anna Heringer : DESI Training Center*. Consulté le 15 octobre 2024, à l'adresse <https://eartharchitecture.org/?p=1566>

Ecobati. (s. d.). *Valeurs lambdas des différents matériaux*. Consulté le 22 avril 2025, à l'adresse : <https://ecobati.com/fr/produits/isolation-thermique/lambda-materiaux>

Ecobuild.Brussels. (n.d.). *Les matériaux biosourcés dans la construction*. Consulté le 23 mars 2025, à l'adresse <https://ecobuild.brussels/wp-content/uploads/2022/07/construction-05-2022-lr-1-21-36.pdf>

ELLE DECOR. (s. d.). *atArchitecture designs pavilion in Faridabad for the Surajkund Craft*. Consulté le 28 octobre 2024, à l'adresse <https://elledecor.in/article/atarchitecture-designs-pavilion-in-faridabad-for-the-surajkund-craft/>

European Commission. (s. d.). *Circular economy action plan*. Consulté le 16 mars 2025, à l'adresse : https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

European Union. (2021). *European Green Deal: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings*. Consulté le 9 septembre 2024, à l'adresse : <https://ec.europa.eu/newsroom/representations/items/730847/default>

European Union. (2024). *Directive (UE) 2024/1275 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte)*. Consulté le 27 janvier 2025, à l'adresse : <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/fra>

Frey, P. (2011). *Construire en bambou : Simon Vélez*. Éditions 387. Consulté le 23 septembre 2024, à l'adresse : <https://infoscience.epfl.ch/server/api/core/bitstreams/cd0a8782-ed55-402d-93cc-8294ff9bc374/content>

Frugalité Créative. (s. d.). *Maison Rauch*. Consulté le 5 septembre 2024, à l'adresse : <https://frugalitecreative.eu/batiments/maison-rauch/>

Futura. (s. d.). *Maisons flottantes traditionnelles en Birmanie*. Consulté le 22 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/planete/photos/voyage-partir-birmanie-voyage-fascinant-antoine-1512/voyage-maisons-flottantes-traditionnelles-birmanie-11055/>

FuturArc. (2024). *Northeast Pavilion at the Surajkund Craft Fair*. Consulté le 28 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.futurarc.com/project/northeast-pavilion-surajkund-craft-fair/>

Gauzin-Müller, D. (2018). *Simon Vélez - Construire avec la nature, un pavillon en bambou, Arles*. D'architectures. Consulté le 8 juillet 2024, à l'adresse : <https://www.darchitectures.com/simon-velez-construire-avec-la-nature-un-pavillon-en-bambou-arles-a4285.html>

Giuroiu, A. (2025). *Rauch House / Roger Boltshauser + Martin Rauch*. Architecture Lab. Consulté le 7 janvier 2025, à l'adresse : <https://www.architecturelab.net/rauch-house-roger-boltshauser-plus-martin-rauch/>

Guide Bâtiment Durable.Brussels. (2024). *Construction en terre crue*. Consulté le 5 octobre 2024, à l'adresse : <https://guidebatimentdurable.brussels/construction-terre-crue>

Housing Now. (s. d.). *Blue Temple*. Consulté le 3 février 2025, à l'adresse : <https://www.blue-temple.com/project/housing-now>

Infobuildenergia. (s. d.). *Complesso scolastico a Gando, Burkina Faso : la bioclimatica africana di Francis Kéré*. Consulté le 16 mars 2025, à l'adresse : <https://www.infobuildenergia.it/progetti/scuola-gando-burkina-faso-bioclimatica-francis-kere/>

IPCC. (s. d.). *FAR Climate Change: Synthesis*. Consulté le 5 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.ipcc.ch/report/ar1/syr/>

IPCC. (s. d.). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Consulté le 3 juillet 2024, à l'adresse : <https://www.ipcc.ch/>

Karbon. (s. d.). Consulté le 26 septembre 2024, à l'adresse : <https://karbon.be/>

Kéré Architecture. (s. d.-a). *Gando Primary School*. Consulté le 22 avril 2025, à l'adresse : <https://www.kerearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>

Kéré architecture. (s. d.-b). Consulté le 26 septembre 2024, à l'adresse : <https://www.kerearchitecture.com/expertise>

Kleiber, M.-A. (2022). *L'architecte Simón Vélez : « Notre halle en bambou érigée à la Défense est un véritable pavillon nomade »*. Le Journal du Dimanche. Consulté le 5 novembre 2024, à l'adresse : <https://www.lejdd.fr/societe/larchitecte-simon-velez-notre-halle-en-bambou-erigee-la-defense-est-un-veritable-pavillon-nomade-1456>

L'atelier Architecture Perraudin. (s. d.-a). *68 logements collectifs en pierre massive à Plan-Les-Ouates*. Consulté le 12 octobre 2024, à l'adresse <https://atelierperraudin.com/travaux/logements-suisse/>

L'atelier Architecture Perraudin. (s. d.-b). *Immeuble mixte*. Consulté le 26 septembre 2024, à l'adresse : <https://atelierperraudin.com/travaux/immeuble-mixte/>

Laurent, J.-P. (2011). *Construire en pierre massive* [PDF]. Consulté le 15 février 2025, à l'adresse : <https://www.pierremassive.com/guides-techniques>

Lehm Ton Erde. (s. d.). Consulté le 15 septembre 2024, à l'adresse : <https://www.lehmtonerde.at/de/>

Leroux, M. (2019). *L'aventure de la construction en pierre massive*. Espazium. Consulté le 29 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.espazium.ch/fr/actualites/laventure-de-la-construction-en-pierre-massive>

Malagnoux, M. (1990). *Contribution à l'étude d'un projet de collection de bambous, d'ornementation des parcs et voies urbaines et de création d'une bambuseraie par la commune du Port (Réunion)*. [Document de la commune du Port].

Maton, I. (2025). *Paroi murale générée à l'aide de l'outil TOTEM* [Illustration]. TOTEM – Outil d'évaluation de l'impact environnemental des bâtiments. Consulté le 22 avril 2025, à l'adresse : <https://www.totem-building.be/>

Mollard, M. (2022). *Global creativity, local potential : Bamboo Hostels in China* by Anna Heringer. The Architectural Review. Consulté le 29 octobre 2024, à l'adresse : <https://www.architectural-review.com/buildings/global-creativity-local-potential-bamboo-hostels-in-china-by-anna-heringer>

- NBN. (2006). *NBN EN 771-6 : 2006*. Consulté le 12 mars 2025, à l'adresse : https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=233876&p40_language_code=fr&p40_detail_id=32464
- Omrانيا. (2017). *A school made by hand, using local knowledge and materials*. Consulté le 29 octobre 2024, à l'adresse <https://omrania.com/inspiration/school-made-hand-using-local-knowledge-materials/>
- Pandam. (s. d.). *Corde végétale pour assembler le bambou*. Consulté le 5 avril 2025, à l'adresse : <https://pandam.fr/products/corde-assemblage-bambou>
- Quinton, M. (2018). *Simón Vélez : l'architecte qui veut renouer avec le végétal*. IDEAT. Consulté le 2 janvier 2025, à l'adresse : <https://ideat.fr/simon-velez-larchitecte-qui-veut-renouer-avec-le-vegetal/>
- Stono. (s. d.). *Chai de la maison Delas*. Consulté le 31 mars 2025, à l'adresse : <https://www.stono.fr/project/delas>
- The Architectural Review. (2020). *Rauch House in Austria by Roger Boltshauser with Martin Rauch*. Consulté le 20 décembre 2024, à l'adresse : <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/rauch-house-in-austria-by-roger-boltshauser-with-martin-rauch>
- Tourneur, F. (2022). *Construire en pierre : Et si on changeait de paradigme ?* Architrave, (211). Consulté le 7 avril 2025, à l'adresse : https://www.architrave.be/cgi-bin/architrave_flipbook.pl?sw=detail_revue&numero=211#flipbook/32
- Vegetal(E). (2015). *Matériaux biosourcés végétale, animale en éco-construction*. Consulté le 5 octobre 2024, à l'adresse : https://www.vegetal-e.com/page.php?lg=fr&champ=document&id_fiche=17

Travail scolaire :

- Collin, L., & Desodt, C. (2020). *Habitations végétales : Ça tient le bambou ? État de l'art*. École normale supérieure Paris-Saclay. <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/12022/12022-constructions-vegetales-ca-tient-le-bambou-ensps.pdf>
- Pestre, T. (2021). *La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction : Étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments* [Thèse de doctorat, Université d'Artois]. <https://hal.science/tel-03521752/>
- Phung, T. A. (2018). *Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : La bauge* [Thèse de doctorat, Normandie Université]. <https://theses.hal.science/tel-01938827>

Document privé :

- Atelier Archiplein. (2025, 11 mars). *Dossier de presse – Projet Coulouvrenière* [Document transmis personnellement].
- Atelier Régis Roudil. (2025, 23 février). *Dossier de presse – Crèche 24 berceaux au Palais de l'Alma* [Document transmis personnellement].
- Gauzin-Müller, D. (s.d.). *TERRA Award* (Textes : D. Gauzin-Müller ; Illustrations : P. Sémon) [Document PDF reçu par courriel].

Teissier Portal. (2025, 10 mars). *Dossier de presse – Groupe scolaire à Opio* [Document transmis personnellement].

Tourneur, F. (2025, 7 avril). *Communication personnelle*.

Ce travail a été imprimé sur du papier recyclé