

LE PISÉ

MATÉRIAU ALTERNATIF DE DEMAIN

Comment favoriser le retour de la matière terre dans le domaine de la construction?
Comment construire en pisé en 2023?

COOLE Noa

LBARC2200 - Travail de fin d'étude *en et sur* l'architecture en vue de l'obtention du Diplôme de Master en
Architecture

Année académique 2022 - 2023

UCLouvain

Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (Site de Bruxelles)

LBARC2200 - Travail de fin d'étude *en et sur* l'architecture en vue de l'obtention
du Diplôme de Master en Architecture

Noa COOLE

Co-promoteurs

Jean-Jacques JUNGERS
Sandrine MEYER
Benoit THIELEMANS
Geoffrey VAN MOESEKE

Experts

Sébastien NIEMANN

« L'architecture en terre crue, dont les usages contemporains sont de plus en plus fréquents et diversifiés, est porteuse d'une modernité alternative qui répond aux exigences de la crise écologique. » (Dethier, 2022)

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais dans un premier temps remercier les professeurs, co-promoteurs *Benoit THIELEMANS & Geoffrey VAN MOESEKE, Jean-Jacques JUNGERS & Sandrine MEYER* pour leur suivi précieux tout au long de l'écriture de ce *Travail de fin d'études en et sur l'architecture*.

Je tiens également à remercier particulièrement *Sébastien NIEMANN* pour sa disponibilité, son intérêt, les conversations enrichissantes partagées et pour les informations transmises.

Je souhaite également partager toute ma gratitude aux personnes suivantes pour leur aide précieuse :

Stefan JESKE du bureau CLÉMENT VERGÉLY ARCHITECTES pour sa réactivité et le partage de ses connaissances en la matière,

Jasper VAN DER LINDEN du bureau BC Materials pour le workshop effectué, les échanges d'informations nécessaires ainsi que la présentation claire de leurs projets,

Et finalement mon groupe d'amis et ma famille pour leur implication, le partage de leurs connaissances ou encore leur soutien continu.

AVANT-PROPOS

Cet écrit est rédigé dans le cadre de l'écriture du Travail de fin d'études (TFÉ) en et sur l'Architecture, au sein de la Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme- LOCI (Site de Bruxelles).

Face aux enjeux actuels auxquels les architectes doivent faire face, mon intérêt en architecture s'est souvent porté sur la matérialité. Ce questionnement autour de la matière évolue au fil de mes années d'études et se précise finalement autour de la terre crue et plus particulièrement du pisé.

L'intérêt ici est d'approfondir mes connaissances sur cette matière oubliée qui tend à refaire ses preuves dans le domaine de la construction. Ces connaissances me permettront de pousser la réflexion lors de la conception et l'élaboration d'un projet architectural.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	7
Avant-propos.....	9
Table des matières.....	11
Liste des illustrations.....	15
Lexique.....	19
I. Introduction.....	21
Petit historique du béton.....	21
Problématique du béton.....	23
Alternatives au béton.....	25
II. État de l'art.....	27
Techniques constructives de la terre crue.....	27
Histoire et origines du pisé.....	31
Méthode traditionnelle et utilisation en Europe.....	31
Le pisé aujourd'hui.....	33
Technique du pisé.....	33
Composition du pisé.....	33
Étapes de production du pisé.....	35
Performances et limites de la matière.....	39
Caractéristiques structurelles.....	39
Étanchéisation du pisé.....	41
Résistance à la vapeur d'eau et à la condensation.....	43
Isolation du pisé.....	45

Résistance au feu	45
Esthétique du pisé.....	45
Impact environnemental de la matière.....	47
III. Questionnements.....	51
IV. Analyse de références.....	53
Choix des références.....	53
Méthodologie appliquée.....	55
Références expérimentales.....	55
Expérimentation terre-à-terre.....	55
Grand monolithe terreux.....	59
Isolation incorporée à la façade.....	61
Jeu d'épaisseur.....	63
Préfabriqué arché.....	65
V. Résultats.....	69
VI. Discussion.....	71
Évolution d'une technique.....	71
Technique traditionnelle revitalisée.....	71
Évolution de la manière de penser.....	73
Mixité Matérielle.....	73
Volumétrie de pisé.....	75
VII. Conclusion.....	77
Bibliographie.....	79
Annexes.....	85

LISTE DES ILLUSTRATIONS

1.1.	<i>"Répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité (données : Manicore & Bribián et al) " (Fasfox, 2022).....</i>	22
1.2.	<i>"Répartition des émissions de GES par matériau pour le secteur de la construction (données : Manicore & Bribián et al) " (Fasfox, 2022).....</i>	22
2.1.	Terre crue (Coole, 2023).....	26
2.2.	Roue des techniques constructives en terre crue par CRAterre (Aeccdoc, 2020).....	28
2.3.	Carte mondiale reprenant les lieux où la construction en terre crue est une coutume en orange et les points représentent les sites classés à l'UNESCO. (Carte inspirée de la carte de CRAterre et de Delbrayelle) (Coole, 2023).....	30
2.4.	Carte représentant la remontée de l'utilisation de la terre crue comme élément traditionnel- arrivée de la terre crue en Europe.(Carte inspirée de la carte de CRAterre et de Delbrayelle) (Coole, 2023).....	30
2.5.	Granulométrie de la matière (Van Der Linden, 2022).....	34
2.6.	Photo de la composition granulométrique du pisé (Coole, 2023).....	34
2.7.	<i>" Ligne de production du pisé " (CRAterre, 2020).....</i>	36
2.8.	<i>"Principe d'une ligne de production du pisé décrivant le cycle de vie du matériau " (CRAterre, 2020).....</i>	38
2.9.	Caractéristiques structurelles / coupes schématiques(Coole, 2023).....	40
2.10.	Soubassement & étanchéité à l'eau / coupe schématique (Coole, 2023).....	40
2.11.	Soubassement & étanchéité à l'eau, mesures / coupe schématique (Coole, 2023).....	42

2.12.	Toiture et étanchéité à l'eau / coupe schématique(Coole, 2023).....	42
2.13.	Étanchéité à l'infiltration d'eau en façade / coupe schématique (Coole, 2023)	42
2.14	Mortier de strass et continuité du pisé / schéma (Coole, 2023).....	42
2.15	Isolation des parois de pisé / coupes schématiques (Coole, 2023).....	44
2.16.	Calculs de résistance thermique du pisé(Coole, 2023).....	44
2.17.	Cycle de vie du pisé (Dorastuder, s. d.-b).....	46
4.1.	Image (Boltshauser Architekten, 2022).....	56
4.2.	Détail technique 1/50 Haus Rauch - Boltshauser Architekten, inspiré de la revue DETAIL (DETAIL , 2009)(Coole, 2023).....	56
4.3.	Image (DETAIL , 2015).....	58
4.4.	Détail technique 1/50 Ricola Kräuterzentrum - Herzog et de Meuron, inspiré de la revue DETAIL (DETAIL, 2015)(Coole, 2023).....	58
4.5.	Image (Haas cook zemmrich STUDIO2050, s. d.).....	62
4.6.	Détail technique 1/50 Alnatura - Haascookzemmrich STUDIO2050, inspiré de la revue DETAIL(DETAIL , 2019)(Coole, 2023).....	62
4.7.	Image (Nunc architectes, 2022).....	64
4.8.	Détail technique 1/50 Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen- NUNC, inspiré du dessin technique du bureau NUNC (Nunc architectes, 2022)(Coole, 2023).....	64
4.9.	Image (Vergely architectes, 2021).....	66
4.10.	Détail technique 1/50 L'Orangerie - Vergely Architectes, inspiré des dessins techniques partagés par Clément Vergély(Coole, 2023).....	66

LEXIQUE

BÉTON - À l'origine le béton est un simple assemblage de matériaux principalement minéraux qui sert à la construction de bâtiments.

BÉTON DE CIMENT- C'est à la fin du XIX^{ème}, début du XX^{ème} siècle que le béton de ciment apparaît (Universalis, s. d.). Sa composition à base de ciment fait de lui un matériau très polluant.

MATIÈRE, MATÉRIAU ET MATÉRIALITÉ - *Ghislain His*¹ détermine de la manière précise la différence entre matière, matériau et matérialité dans son récit sur la matière.

” La matière dite première, voire pour certains à l'état naturel, est tout ce qui a une masse et occupe de l'espace, dans quatre états possibles : solide, liquide, gazeux ou plasma. Un matériau, quant à lui, possède des propriétés particulières qui expliquent les raisons de son utilisation dans un objectif précis. On pourrait même dire que dès que quelqu'un envisage d'utiliser une matière pour fabriquer ou construire quelque chose, elle devient matériau. La matérialité serait, enfin, le caractère concret et la qualité d'une construction matérielle, un arrangement spécifique de matériaux.

La matérialité participerait ainsi d'un cycle de transformation progressif de la matière en matériau, puis de matériaux en une matérialité, ce cycle de transformation étant en lui-même un cycle de production. ” (His, 2015)

PISÉ - Cette technique consiste à réaliser des parois à base de terre crue compactée dans un moule (préfabriqué ou sur place).

1 *Ghislain His* est professeur à l'Ensap (École nationale supérieure d'architecture et de paysage) à Lille. Il s'intéresse actuellement à lier *”recherche, enseignement et production architecturale”*.

I. INTRODUCTION

Afin de comprendre les enjeux qui poussent à cette réflexion autour de la matérialité, nous allons ici rapidement retracer l'histoire du béton et ce qui fait de lui le matériau par référence dans le domaine actuel de la construction. Nous analyserons ensuite son impact environnemental de façon à réaliser l'importance et la nécessité d'envisager le développement de matériaux alternatifs tel que le pisé.

- PETIT HISTORIQUE DU BÉTON -

Les premiers à avoir utilisé le béton qui s'apparente le plus au béton de ciment utilisé aujourd'hui, sont les Romains durant l'Antiquité. Cette technique a ensuite été oubliée avec le déclin du Moyen Âge avant de faire son retour vers la fin du XIX^{ème} siècle avec la révolution industrielle et la découverte des ciments artificiels. (Universalis, s. d.)

Joseph Monier est le premier à découvrir et réaliser des petites constructions à base de ciment armé et d'un système de ferrailage. Il dépose différents brevets à ce sujet entre 1867 et 1891. Viennent également les premières constructions en béton coulé réalisées par *François Coignet* ou encore *François Hennebique*, entre 1852 et 1867. (LAFARGE FRANCE, 2023)

C'est le début de l'emploi massif de ce matériau. Il prend ensuite un rôle majeur durant et après la première et la seconde guerre mondiale, notamment lors des périodes de reconstruction qui suivirent. Le béton de ciment est alors choisi comme matériau de prédilection pour sa performance et sa rapidité de mise en œuvre. À partir de ce moment-là, le béton de ciment est utilisé dans plusieurs domaines allant du logement à la construction de grandes infrastructures comme les routes ou encore les ponts.

L'utilisation de ce matériau, connu pour sa polyvalence, sa résistance, sa

Émissions GES en fonction du secteur industriel

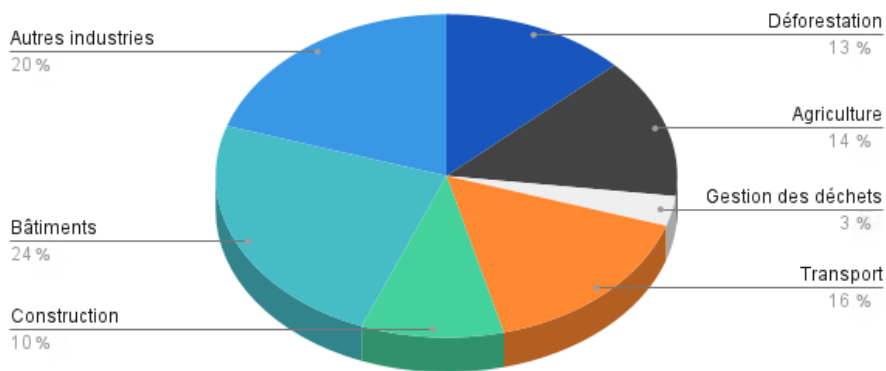


FIGURE 1.1- " Répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité (données : Manicore & Bribián et al) "
(Fasfox, 2022)

Émissions GES en fonction du matériau

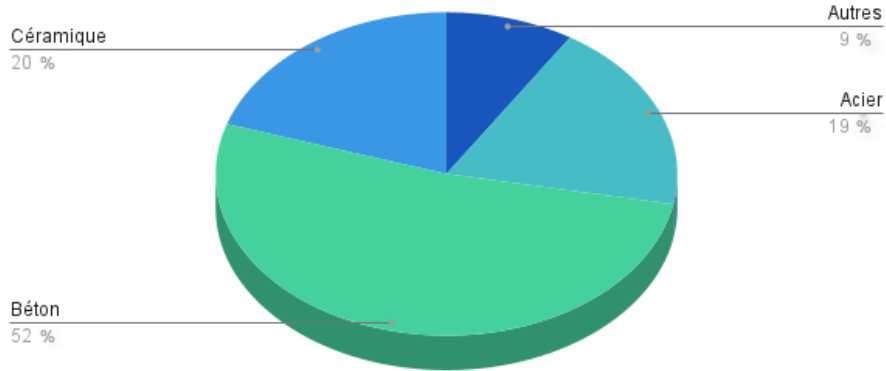


FIGURE 1.2- " Répartition des émissions de GES par matériau pour le secteur de la construction (données : Manicore & Bribián et al) "
(Fasfox, 2022)

modularité, son accessibilité, son esthétique ou encore sa facilité de mise en œuvre à faible coût, prend une place centrale dans le domaine de la construction et révolutionne l'architecture. (Buttin, 2020) Le béton de ciment, tel que nous le connaissons aujourd'hui, est alors le matériau par référence du XX^{ème} et XXI^{ème} siècle.

- PROBLÉMATIQUE DU BÉTON -

Malgré ces caractéristiques plutôt attrayantes, il ne faut pas négliger l'empreinte carbone qu'engendre l'utilisation de ce matériau. De nos jours, le domaine de la construction représente près de 40% de la consommation globale d'énergie et est la cause de près de 30% des émissions de gaz à effet de serre. La production de béton de ciment figure en haut de cette liste de matériaux polluants. Celle-ci correspond quant à elle jusqu'à 8% de ces émissions. (Buttin, 2020) (FIGURE 1.1 & FIGURE 1.2)

Lorsque l'on parle de pollution, c'est tout le processus de construction qui joue un rôle là-dedans et pas seulement la matérialité. L'exploitation de ressources, la fabrication des matériaux, le transport des matériaux, etc, tout cela contribue à cet enjeu environnemental. La grande question qui se pose est de savoir comment un simple matériau tel que le béton peut être source de tant d'émissions de CO₂. La réponse est plutôt simple. Le béton est fabriqué à base de ciment, de granulats, d'eau et d'autres adjuvants. Chacun de ces éléments pose problème de par leur composition car des éléments viennent à manquer ou de par leur fabrication, libératrice d'une grande quantité de CO₂.

GRANULATS - Les granulats sont un mélange de sables et de pierres concassées. Il faut savoir que le sable utilisé pour le béton est une ressource qui est en train de disparaître. Seulement 5% du sable sur terre est utilisable pour la fabrication du béton de ciment. (Combe, 2022)

ADJUVANTS - Les adjuvants sont simplement des constituants ajoutés lors de la fabrication du béton en très faibles quantités ; en voici la liste : les plastifiants réducteurs d'eau, les fluidifiants, les accélérateurs de prise, les retardateurs de prise, les hydrofuges, les entraîneurs d'air et finalement l'eau de gâchage. Ces différents adjuvants font du béton un matériau non-recyclable ou réutilisable après sa fabrication. (GuideBeton.com, s. d.)

CIMENT - Le ciment est quant à lui le principal composant du béton et est fait à base de clinker. Le clinker est le résultat de calcaire et d'argile chauffé à haute

température. Ce processus de chauffe relâche une énorme quantité de CO₂. Il faut également noter que le ciment est nécessaire au béton car il sert de liant entre les cailloux et le sable lors de la fabrication du mélange. Sans lui, le béton de ciment ne garderait pas ses mêmes propriétés. (Bloch, 2008)

En résumé, le béton de ciment est principalement problématique en raison de sa composition notamment due à une pénurie de sable et à la grande quantité de CO₂ émise lors de la production de ciment.

Voici quelques chiffres qui permettent de quantifier la problématique.

" [...] La production d'une tonne de ciment génère ainsi environ une tonne de ce gaz à effet de serre. [...] " (Bloch, 2008)

" [...] Si le béton utilisé sur la planète était un pays, il serait le troisième émetteur mondial de gaz à effet de serre, juste derrière la Chine et les États-Unis.

[...] Le ciment est le matériau le plus consommé dans le monde, à raison de quelque 150 tonnes par seconde.

[...] La seule production de ciment, ingrédient clé du béton, génère 7% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂), selon la GCCA - trois fois plus que le transport aérien. " (Afp, 2021)

L'implication du béton dans cette problématique de la matérialité en construction et en architecture est plutôt claire. Il est ainsi nécessaire de considérer l'utilisation et le développement de matériaux alternatifs plus durables.

- ALTERNATIVES AU BÉTON -

La liste des matériaux utilisés pour la construction d'un bâtiment est longue. Pourtant les alternatives au béton, possédant des qualités similaires (polyvalence, résistance, modularité, accessibilité, esthétique, facilité de mise en œuvre, etc) à celui-ci, ne sont pas abondantes.

On retrouve en l'occurrence le bois, la pierre, la métallurgie, la terre cuite ou encore la terre crue. Chaque matériau pourrait offrir une réponse plus ou moins correcte à la problématique et comme précisé précédemment, l'alternative développée ici est le pisé. (Pôle éco-conception , 2014)



FIGURE 2.1 - Terre crue (Coole, 2023)

II. ETAT DE L'ART

Afin de développer et comprendre cette alternative de terre crue, nous allons approfondir le sujet autour du pisé en commençant par un bilan du savoir acquis autour de cette technique particulière de construction. Cet état de l'art permet d'étaler les connaissances en la matière (histoire, limites, connaissances techniques, etc).

- TECHNIQUES CONSTRUCTIVES DE LA TERRE CRUE -

La terre est la matière la plus ancienne utilisée dans le domaine de la construction. Oubliée et dévalorisée, cette matière est désormais considérée comme étant la "matière du pauvre" (en Afrique notamment) et n'est par là que peu utilisée de nos jours. En Europe, cette matière utilisée autrefois, tend à réapparaître petit à petit. Aujourd'hui, il est possible de revaloriser cette matière, de travailler cette terre ; de la comprimer, de la tasser, de la former, de l'assembler de différentes manières.

Nous allons passer en revue les possibilités qu'offre la terre crue afin de mieux comprendre ce qu'est le pisé et ensuite nous allons identifier ce qui le différencie des autres techniques constructives de la terre crue. Pour cela, nous prenons appui sur l'écrit de *Jean Dethier* (Dethier, 2022) et la roue des techniques constructives en terre crue par CRAterre. (FIGURE 2.2)

CREUSER - Dans certains cas, la terre est creusée afin de créer des cavités dans la terre crue directement. Ces cavités forment des espaces habitables, dits troglodytiques. Ce type d'architecture travaille la terre à l'état brut. Un exemple pour illustrer la terre creusée est la ville de Matera en Italie.

COUVRIR - La terre peut également servir à couvrir une structure existante.

De nos jours, ce type d'intervention s'apparente aux toitures végétales.

REEMPLIR - Des modules creux porteurs ou non, peuvent être remplis de terre crue.

COUPER - Cette technique vise à couper directement dans la terre des mottes avant de les utiliser en maçonnerie.

COMPRIMER - Cette méthode permet l'élaboration de différents types de matériaux de construction comme les briques de terre crue, également appelées BTC, les briques de terres pilonnées ou encore le pisé. Comprimer la terre permet d'avoir des éléments comprimés sur place ou préfabriqués. Cette technique demande l'utilisation de moules ou de coffrages afin de compacter la terre. Cette technique de terre comprimée, pisé, est la technique étudiée au sein de ce travail car elle a un potentiel de développement à l'heure d'aujourd'hui, que nous développerons plus tard.

FAÇONNER - Il est également possible de façonner la terre, souvent directement à la main afin de construire des parois fines. Il est nécessaire dans ce cas de jouer avec la plasticité et la malléabilité de la terre.

EMPLILER - Cette technique permet de construire des murs verticaux porteurs et pour cela, des boules sont formées à la main avant d'être assemblées et empilées. Cette technique n'est que très peu utilisée en Europe.

MOULER - La terre moulée, autrement appelée *Adobe*, est une technique qui consiste à mouler la terre encore humide sous formes de briques puis de les laisser sécher avant leur emploi. Afin d'avoir des blocs rigides, aux propriétés constructives intéressantes, la terre est mélangée avec des fibres végétales.

EXTRUDER - Ici, la terre est découpée dans le sol sous formes de briques ou de blocs. Cette technique n'est restée qu'au stade d'expérimentation car elle n'a pas fait ses preuves dans le domaine architectural.

GARNIR - Cette technique s'appelle le torchis. La terre est ici mélangée à des fibres végétales et sert de remplissage entre un lattage de bois ou de bambou dans les murs porteurs. Cette technique est une des techniques les plus répandue dans le nord de l'Europe.

COULER - Il est possible de couler la terre dans un coffrage comme le béton

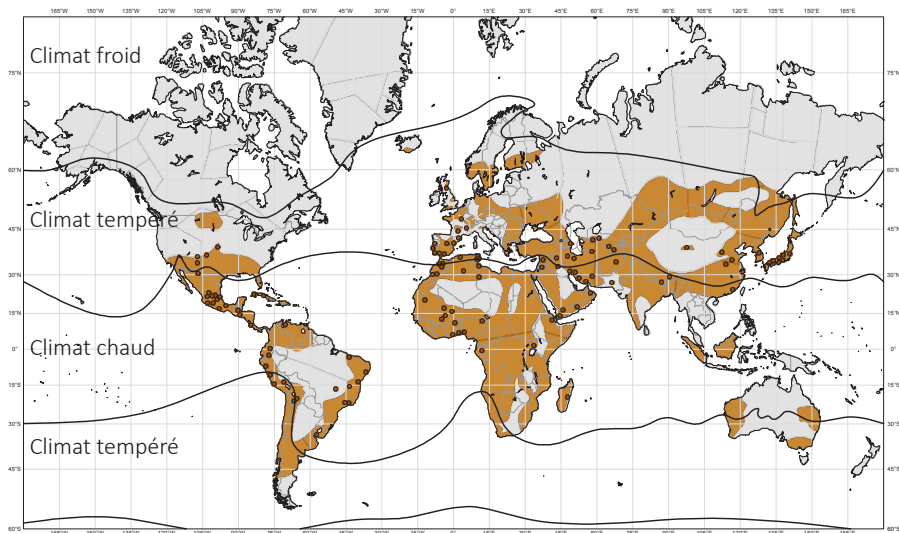


FIGURE 2.3 - Carte mondiale reprenant les lieux où la construction en terre crue est une coutume en orange et les points représentent les sites classés à l'UNESCO. (Carte inspirée de la carte de CRATERre et de Delbrayelle) (Coole, 2023)

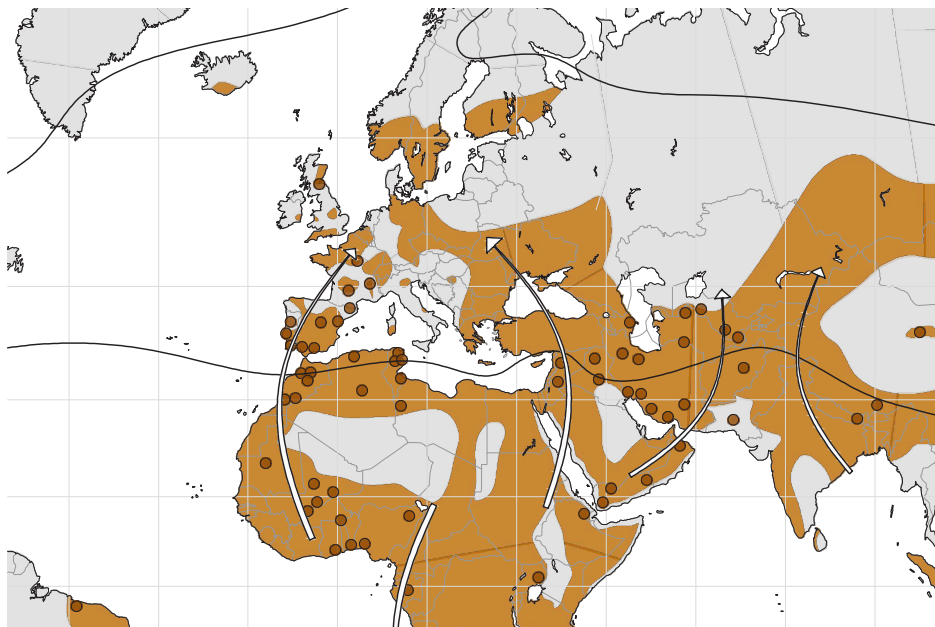


FIGURE 2.4 - Carte représentant la remontée de l'utilisation de la terre crue comme élément traditionnel - arrivée de la terre crue en Europe. (Carte inspirée de la carte de CRATERre et de Delbrayelle) (Coole, 2023)

de ciment est coulé en place. Cette technique est assez récente et utilise la terre à l'état liquide. Cette technique demande souvent un ajout de ciment à très faible dose et cela rend la matière terre inapte au réemploi et à la réutilisation après son cycle de vie. La terre crue coulée peut être utilisée en complémentarité d'une structure bois par exemple.

COLLER - Appelée terre-paille ou terre allégée, cette technique est un mélange de terre crue et de fibres végétales en tout genre et sert de remplissage pour les parois verticales ou les surfaces horizontales. Ce procédé est très facile à modeler et à appliquer, ce qui fait de lui un objet d'étude contemporain.

Maintenant que la différenciation entre les différentes techniques est acquise, le choix est de développer la technique du pisé, de terre crue comprimée.

- HISTOIRE ET ORIGINE DU PISÉ -

Nous allons maintenant rapidement parcourir l'histoire du pisé et ses origines afin de déterminer comment il en est arrivé jusque-là et pourquoi il a toute son importance dans la construction aujourd'hui.

- MÉTHODE TRADITIONNELLE ET UTILISATION EN EUROPE -

La terre crue est utilisée depuis plus de 10'000 ans pour construire des habitations en tout genre aux quatre coins de la planète. Elle a été choisie pour modeler différents types de constructions telles que des palais, des logements, des forteresses ou des villes dont des traces sont encore visibles de nos jours. (Universalis, s. d.-a)

L'utilisation de la terre crue en construction a toujours été particulièrement traditionnelle sur le continent africain, sur le sud de l'Asie et de l'Amérique du nord et en Amérique du Sud. Ces zones dites chaudes et intertropicales ont un climat favorable à l'utilisation de la terre crue ; la ressource terre est accessible et apte à la réalisation d'une bonne construction en terre crue. L'emploi de cette matière s'est ensuite étendu aux zones dites tempérées, s'emparant ainsi d'une partie de l'Europe et de l'Asie. (FIGURE 2.3 & FIGURE 2.4)

Le pisé et la construction en terre crue arrive en Europe il y a près de 2000 ans en arrière. C'est au XVIème siècle que cette technique prend de l'ampleur en Europe avec le développement rapide de grandes villes, principalement en Belgique, Espagne, France, Portugal ou encore en Allemagne, Autriche, Suisse,

etc. (EPFL, 2017) À partir de ce moment-là, la terre devient un élément de construction traditionnel. *François Cointereaux* modernise l'utilisation du pisé en France sur la fin du XVIII^{ème} siècle. (Dethier, 2022)

Cette technique est ensuite mise de côté vers la fin du XIX^{ème} siècle par l'apparition du béton de ciment qui prend son rôle majeur dans le domaine de la construction. (Asterre , 2018)

- LE PISÉ AUJOURD'HUI -

Désormais, plus d'un tiers de la population globale sur terre vit actuellement dans des maisons faites complètement ou en partie de terre crue. (Universalis, s. d.-a) La terre crue a ainsi fait ses preuves et nous prouve ses compétences : structurelle, temporelle, esthétique, etc.

Ce n'est que récemment que le pisé et la terre crue font leur réapparition, avec la crise environnementale actuelle en cours. Ce sont en l'occurrence certains architectes, chercheurs, entrepreneurs, etc, qui lancent ce mouvement de "retour de la matière terre oubliée".

Jean Dethier cite *Winston Churchill* dans son livre et celui-ci nous déclare : "*La société conditionne l'architecture et dès lors l'architecture conditionne la société.*". (Dethier, 2022) Le métier d'architecte prend toute son importance ; l'architecte est non seulement bâtisseur mais également responsable du futur dans le domaine du bâtiment. Il devient désormais responsable des choix environnementaux, économiques et sociaux. Il doit être critique quant à la matérialité et les méthodes constructives choisies au sein de ses projets.

- TECHNIQUE DU PISÉ -

Nous allons maintenant faire état des connaissances de la technique du pisé et de la façon dont il est produit puis construit afin de bien comprendre comment ce matériau fonctionne. Ces connaissances permettront ensuite de constater les caractéristiques et les limites du pisé.

- COMPOSITION DU PISÉ -

Le pisé est tout d'abord un mélange équilibré de plusieurs matières : de l'argile,



FIGURE 2.5 - Granulométrie de la matière
(Van Der Linden, 2022)



FIGURE 2.6 - Photo de la composition granulométrique du pisé (Coole, 2023)

du limon, du sable, des graviers de différentes tailles et de l'eau.¹

La production d'un pisé de bonne qualité est en réalité une question de juste densité de roches et de sable, accompagnés d'eau et d'argile lors du processus d'assemblage des matières. L'argile sert de colle, de liant dans l'assemblage de matière pour la création du pisé. On assemble en général de la plus grosse granulométrie à la plus fine en finissant par ajouter l'eau. De cette façon, les éléments de plus petite granulométrie viennent se glisser entre les matières de plus grosse granulométrie. (FIGURE 2.5 & FIGURE 2.6) Il faut noter que le mélange ne doit pas contenir de matières végétales car cela impacterait ses caractéristiques mécaniques. (Asterre, 2018)

- ÉTAPES DE PRODUCTION DU PISÉ -

La production de pisé pour la construction en terre suit un déroulement précis ou chaque étage a son importance. (FIGURE 2.7 FIGURE 2.8) Les étapes sont approximativement les mêmes que ce soit pour le pisé préfabriqué ou non. Ces étapes sont développées selon le livre de CRATerre. (CRATerre, 2020)

EXTRACTION - L'extraction se fait de façon manuelle ou mécanique plus ou moins à proximité du site où la construction en pisé est faite. Il est possible d'extraire de la terre possédant déjà toutes les qualités nécessaires pour le mélange à pisé. Si cette terre n'est pas de bonne qualité, il est possible d'avoir plusieurs sites d'extraction de terres qui ont chacun leur rôle bien précis.

STOCKAGE - Une fois que les différents types d'ingrédients nécessaires à la composition du pisé sont extraits du sol, il est nécessaire de les stocker dans un endroit sec, à l'abri de la pluie. Les éléments sont transportés dans cet espace de stockage. Cet espace de stockage est situé sur le site du projet lorsque le pisé est fabriqué directement sur place. Il est également possible que cet entrepôt soit situé à proximité du site du projet où les éléments sont préfabriqués et stockés jusqu'à l'assemblage du bâti.

DOSAGE - Comme précisé dans la partie "Composition du béton", l'importance d'un bon dosage de chaque ingrédient est primordial afin d'empêcher toute dégradation des performances du pisé.

1 En l'occurrence, lors du workshop chez BC Materials, ceux-ci partagent la recette de leur mélange composé à 8% d'argile rouge avec 17% de limon, 17% de sable bruxellois, 25% de sable de rivière, 33% de gravier et de l'eau pour parvenir à produire un assemblage pour le pisé nommé Kastar.

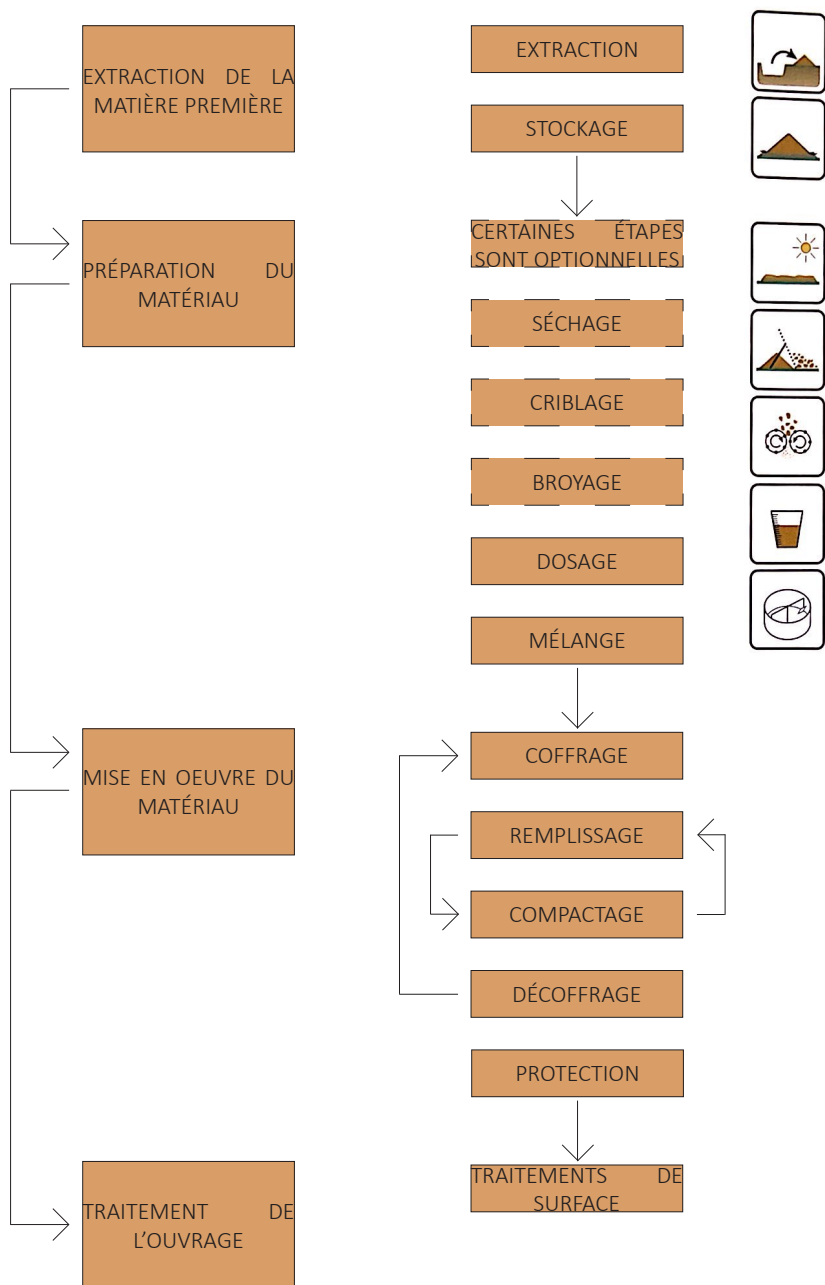


FIGURE 2.7 - " Ligne de production du pisé "
(CRATERre, 2020) (Coole, 2023)

MÉLANGE - Les différents types de terre sont mélangés à l'eau avant d'atteindre un mix parfait pour le pisé. Il est difficile de savoir si la terre sur site ou si le mélange est de bonne qualité ou non. Il existe un certain nombre de tests possibles à faire, au préalable ou au moment de fabriquer le mélange. CRATerre fait état de dix types d'analyses possibles à faire au préalable de la construction en terre. (CRATerre, 2006) Nous ne développerons pas cette série de tests ici.

COFFRAGE - L'étape du coffrage est une étape importante car c'est elle qui va permettre l'édification totale du bâtiment et qui permet de compacter la terre pour façonner les parois verticales. Traditionnellement, les murs de pisés sont construits sur des soubassements faits de pierre, de béton ou autre matériau porteur hydrofuge. Les ouvertures sont prévues à l'avance lors de l'installation du coffrage et des linteaux sont également installés.

Le coffrage est adapté aux mesures nécessaires pour la bonne tenue du pisé. L'épaisseur de la paroi en pisé varie en fonction de la hauteur du bâti (nombre d'étages), des charges à supporter si cette paroi est un élément porteur, de la zone dans laquelle le bâti est construit, etc. L'épaisseur minimum d'un mur est de 35cm. (CRATerre, 2020) Le coffrage doit être enlevé une fois que la totalité du mur est compacté et non lorsque la terre est considérée comme sèche. Le pisé sèche à l'air libre. (Berkowicz, s. d.)

REPLISSAGE - Le mélange est ensuite versé dans un coffrage par couches de 10 à 15cm d'épaisseur. Il est important de respecter cette étape afin que le compactage soit possible et fait correctement à l'étape suivante.

COMPACTAGE - La terre est compactée manuellement à l'aide d'un pisoir ou de manière mécanique à l'aide d'un fouloir pneumatique. (CRATerre, 2020) Le compactage est une étape importante dans les constructions en pisé car elle permet de condenser fortement la matière terre et une fois que le mur ou le bloc est sec, il est dur comme la pierre. Lors du compactage de la terre, l'épaisseur d'une couche diminue d'un tiers de son épaisseur de base ; si une couche de 15cm de terre est compactée, la couche de matière condensée est alors de 10cm.

Le compactage de la matière permet aux éléments verticaux de devenir porteurs et de supporter les charges en compression du bâtiment.² Il faut bien faire attention de compacter la terre dans les coins de la paroi verticale

² Il faut noter que le pisé est un matériau supportant bien les charges en compression et non la traction. Il faut ainsi savoir jouer sur les caractéristiques particulières de la matière.

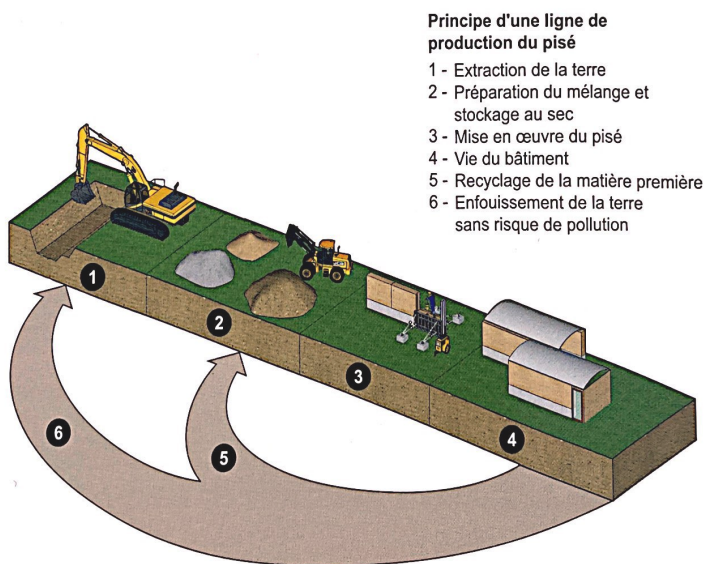


FIGURE 2.8 - " Principe d'une ligne de production du pisé décrivant le cycle de vie du matériau " (CRATERre, 2020)

réalisée car ce sont en général les zones les plus friables si la terre n'est pas tassée correctement.

Cette étape a réformé l'utilisation du pisé. Depuis d'Antiquité, la technique du pisé n'a que peu évolué. Ce n'est qu'arrivée à l'époque moderne que la mécanisation du système de compactage du pisé réforme l'utilisation de ce matériau. (Berkowicz, s. d.) La technique passe d'un compactage manuel à l'aide d'un psoir à une technique plus mécanique par l'invention de la première compresse manuelle à pisé en 1958. Puis en 1981, la technique prend une nouvelle tournure avec l'invention d'éléments préfabriqués en pisé. (Batiweb, 2020) Bien que ce mode constructif ait traversé les siècles, ce n'est que récemment que sa technique a été menée à évoluer.

Les deux étapes du remplissage et du compactage doivent être répétées jusqu'à arriver à la hauteur souhaitée du mur en pisé.

PROTECTION - La paroi verticale faite en pisé nécessite ensuite une protection car la base d'une bonne construction en pisé est que celle-ci doit avoir une bonne base et une bonne couverture afin d'empêcher la terre d'absorber l'eau. Il peut s'agir ici d'un élément en pierre, béton ou autre matériau qui sert de finition au mur ou tout simplement d'une toiture couvrant la paroi de pisé.

TRAITEMENT DE SURFACE - Cette dernière étape permet de réajuster les petites erreurs suite au décoffrage de l'élément conçu. Cette étape permet de corriger les défauts directement sur la paroi encore humide si nécessaire.

- PERFORMANCES ET LIMITES DE LA MATIÈRE -

Nous allons maintenant étudier les performances et les limites du pisé dans le but de découvrir les meilleures méthodes de construction en terre, leurs qualités et leurs défauts. Pour cela, nous allons nous inspirer des écrits de CRATerre sur la construction en pisé et du livre de *Jean Dethier* sur l'art de bâtir. (CRATerre, 2020) & (Dethier, 2022)

- CARACTÉRISTIQUES STRUCTURELLES -

Le pisé est composé de couches de terres compressées et supporte ainsi les charges en compression qui lui sont appliquées. Il ne résiste pas aux charges de traction ou de cisaillement de qui lui sont demandées. Le pisé peut ainsi

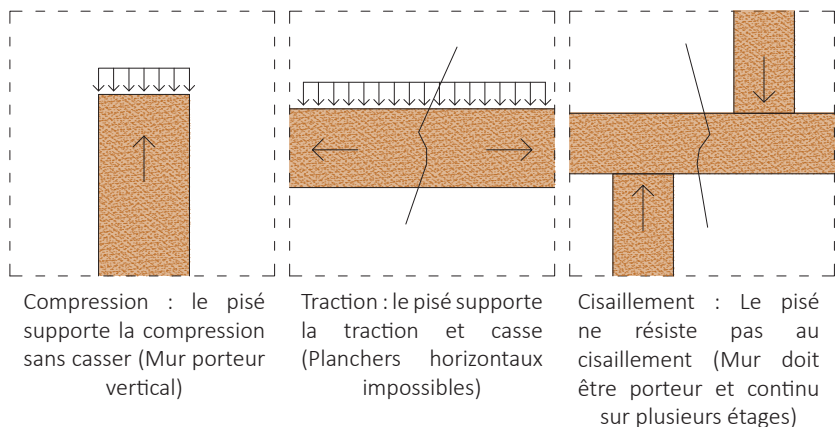


FIGURE 2.9 - Caractéristiques structurales / coupes schématiques (Coole, 2023)

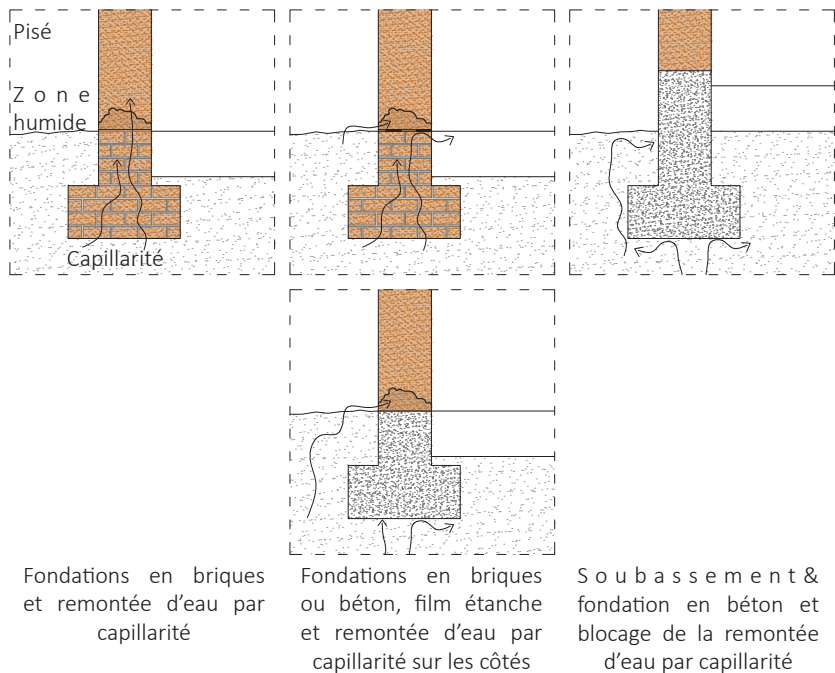


FIGURE 2.10 - Soubassement & étanchéité à l'eau / coupes schématiques (Coole, 2023)

être porteur pour tout ce qui est parois verticales et supporter des planchers et des toitures. Il ne peut en l'occurrence pas être utilisé pour des parois horizontales tels que des planchers. Il est nécessaire d'utiliser des matériaux complémentaires pour supporter les charges en traction appliquées au bâti. Le pisé peut tout de même être utilisé en revêtement de sol en tant que finition et non structurellement parlant. (FIGURE 2.9)

Les parois en pisé porteur sont modelées de manière à supporter les charges en compression d'un autre matériau tel que le bois par exemple, résistant lui à la traction et au cisaillement.

ÉPAISSEUR - Les murs en pisé sont épais et massifs afin de maximiser la portance du mur. En moyenne une paroi varie de 35 à 60 cm d'épaisseur en fonction du nombre d'étages. Dans certains cas, ce mur peut être encore plus épais afin de supporter des charges plus élevées. (CRAterre, 2020)

LONGUEUR - La paroi en pisé est au minimum trois fois la longueur de l'épaisseur de la paroi. Si le pisé est de 40 cm d'épaisseur, le mur s'étend au minimum sur une longueur de 1m20. Il faut également faire attention qu'un mur dépassant les 5 m de longueur ait un joint de retrait ou une étude spécifique pour être sûr que la paroi ne se fissurera pas sous l'effort de compression. (CRAterre, 2020)

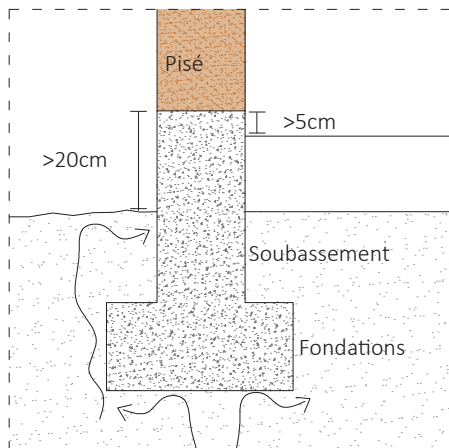
HAUTEUR - Il est conseillé de ne pas dépasser les constructions de plus de cinq étages en terre. (CRAterre, 2020)

- ÉTANCHÉISATION DU PISÉ -

Le pisé est constitué de terre, matière perméable à l'eau. Le pisé est ainsi extrêmement sensible à l'eau. Des mesures doivent être prises durant la fabrication du pisé, durant le temps de séchage de celui-ci et durant sa durée de vie en tant que paroi. Pour cela des dispositions sont mises en place.

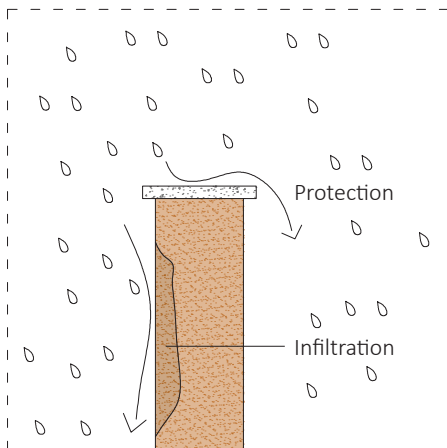
DOSAGE - Il est d'abord nécessaire de bien doser le mélange de terres et d'eau, pour que la teneur en eau du pisé ne soit pas trop élevée et n'impacte la résistance du matériau.

SOUBASSEMENT - Il est également primordial d'offrir un soubassement imperméable à l'eau afin d'éviter toutes remontées capillaires de l'eau dans le pisé. Ce soubassement est fait de pierre, de béton, ou d'autres matériaux



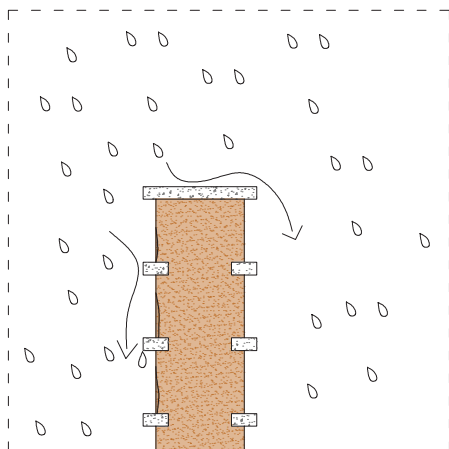
Soubassement & fondation en béton et blocage de la remontée d'eau par capillarité

FIGURE 2.11 - Soubassement & étanchéité à l'eau, mesures / coupe schématique (Coole, 2023)



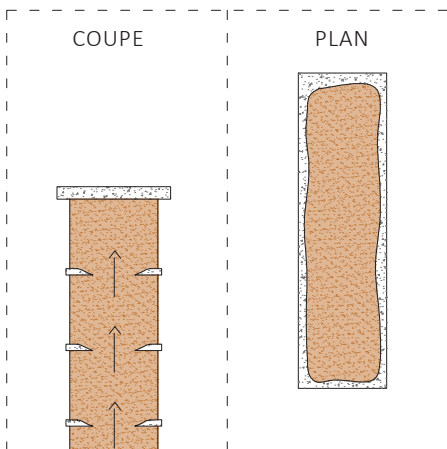
Protection contre l'infiltration d'eau sur le sommet du pisé

FIGURE 2.12 - Toiture et étanchéité à l'infiltration d'eau / coupe schématique (Coole, 2023)



Soubassement & fondation en béton et blocage de la remontée d'eau par capillarité

FIGURE 2.13 - Étanchéité à l'infiltration d'eau en façade / coupe schématique (Coole, 2023)



Mortier de strass sur le pourtour sur mur en pisé afin de garder la continuité de terre sur le milieu

FIGURE 2.14 - Mortier de strass & continuité du pisé (Coole, 2023)

imperméables et doit être parfaitement étanche à l'eau. Il remonte au-dessus du niveau du sol et est de plus de 20cm minimum afin de protéger le pisé de toute infiltration possible. (CRAterre, 2020) (FIGURE 2.10 & FIGURE 2.11)

COUVERTURE - De plus, le pisé nécessite une partie couvrante afin d'éviter le ruissellement de l'eau et son infiltration sur le sommet de la paroi. (FIGURE 12)

FAÇADE - Pour ce qui est de l'érosion, vent et pluie, il est possible et conseillé d'ajouter un mortier de trass toutes les huit couches de terre, directement dans le coffrage lors du compactage de la matière. Cela équivaut environ à tous les 65 cm. Ce mortier de trass est composé de tuf volcanique et de chaux. Le mélange, une fois compacté, est imperméable à l'eau et s'apparente à de la pierre. Ce dernier élément qui permet de ralentir l'érosion de la façade est une technique approfondie récemment. (Detail, 2015) (FIGURE 2.13) Un autre type de mélange peut être proposé pour contrer l'érosion du pisé.

Le mortier de trass doit être compacté d'une manière bien précise. Il faut rajouter une couche de ce mélange toutes les huit couches sans interrompre la continuité de la matière terre. Il faut donc compacter cette matière seulement sur le tour du coffrage et dans les coins sans mettre du mortier au centre. Cette technique peut également être répétée plus dans les coins afin de renforcer les bords de la paroi. (FIGURE 2.14)

Petite information complémentaire : *Martin Rauch* est un des seuls à avoir expérimenté dans sa maison personnelle, l'utilisation du pisé en dessous du niveau 0. Pour cela, il isole et met une étanchéité sur l'extérieur du mur tout en renforçant sa structure en pisé. (Boltshauser Architekten, 2022) Cette référence architecturale est développée plus tard dans le travail.

- RÉSISTANCE À LA VAPEUR D'EAU ET À LA CONDENSATION -

Le coefficient de résistance de la vapeur d'eau μ est situé entre 9 et 10,6 [//]. (Heitz, P., Morel, J.-C., Fabbri, A., Soudani, L., Champire, F. & Meunier, N., 2015) Le coefficient est situé autour de 10, ce qui signifie qu'il laisse passer la vapeur d'eau relativement facilement. *"Les caractéristiques de résistance à la vapeur d'eau, de capillarité et de sorption/désorption du pisé permettent d'éviter les risques de condensation, d'humidité superficielle critique et de condensation dans la masse."* (CRAterre, 2020)

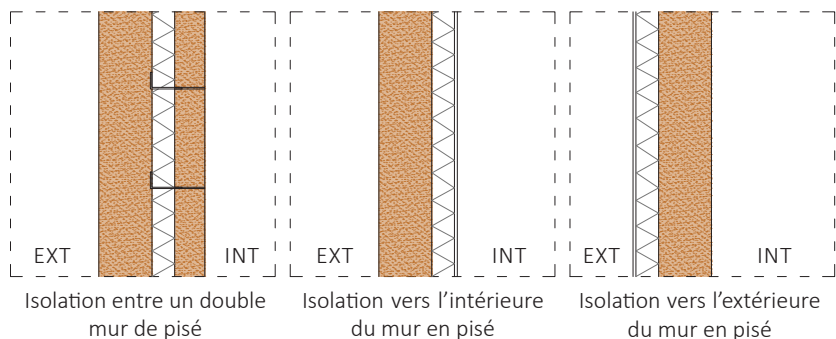


FIGURE 2.15 - Isolation des parois de pisé / coupes schématiques (Coole, 2023)

CALCUL DE RÉSISTANCE THERMIQUE

$$R = e / \lambda$$

à noter que e équivaut à l'épaisseur du mur en m et λ est l'indice de conductivité thermique en W/mK .

Les lambdas sont directement pris du site Calculis. (Calculer la résistance thermique d'une paroi, s. d.)

PISÉ	$\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$
BÉTON	$\lambda = 1,75 \text{ W/mK}$
PIERRE DURE	$\lambda = 2,91 \text{ W/mK}$
VERRE	$\lambda = 1 \text{ W/mK}$
PANNEAU OSB	$\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$
ISOLANT EN LIÈGE	$\lambda = 0,050 \text{ W/mK}$

Supposons que la paroi est considérée comme isolante à partir d'un $R = 2,5$.

PISÉ	$e = R \times \lambda = 2,5 \times 0,8 = 2 \text{ m}$
BÉTON	$e = R \times \lambda = 2,5 \times 1,75 = 4,375 \text{ m}$
PIERRE DURE	$e = R \times \lambda = 2,5 \times 2,91 = 7,275 \text{ m}$
VERRE	$e = R \times \lambda = 2,5 \times 1 = 2,5 \text{ m}$
PANNEAU OSB	$e = R \times \lambda = 2,5 \times 0,13 = 0,325 \text{ m} = 32,5 \text{ cm}$
ISOLANT EN LIÈGE	$e = R \times \lambda = 2,5 \times 0,050 = 0,125 \text{ m} = 12,5 \text{ cm}$

Cela implique que pour qu'une paroi en pisé soit isolante elle doit avoir une épaisseur de 2m.

FIGURE 2.16 - Calculs de résistance thermique du pisé (Coole, 2023)

Cela signifie que de façon général la paroi à elle seule en pisé ne nécessite pas de pare-vapeur car il n'y a pas de risque de condensation.

Si la paroi est isolée ou complétée d'un revêtement ou d'une double peau, il est nécessaire de calculer la résistance à la vapeur d'eau afin de savoir s'il y a risque de condensation ou pas. Pour ce calcul, il est nécessaire de suivre la méthode de Glaser.

- ISOLATION DU PISÉ -

RÉSISTANCE THERMIQUE - La terre est un mauvais isolant thermique mais stocke l'énergie accumulée. (42jerome, 2007) Un mur en pisé nécessite une isolation complète par l'extérieur ou par l'intérieur selon le climat dans lequel il est construit et selon la pensée constructive de l'architecte. (FIGURE 2.15)

Suite à un calcul rapide de résistance thermique du pisé, nous notons qu'il est nécessaire de construire une paroi de 2m d'épaisseur de pisé pour que celui-ci soit isolant thermiquement. Pour avoir les mêmes caractéristiques isolantes, le béton doit avoir une épaisseur de 4,375m, la pierre dure une épaisseur de 7,275m, le verre une épaisseur de 2,5m, un panneau d'OSB une épaisseur de 32,5cm et une paroi d'isolant en liège une épaisseur de 12,5cm. (FIGURE 2.16)

Le pisé est ainsi plus isolant que la pierre ou le béton mais cela ne suffit pas. Il est nécessaire d'isoler les parois en pisé dans certains climats, comme tout autre matériau.

ISOLATION PHONIQUE - La Loi de masse s'applique lorsqu'il s'agit d'une paroi faite d'un seul matériau, le pisé en l'occurrence ici. De façon générale, plus la paroi est épaisse, lourde et la matière compacte, plus la paroi absorbe les sons. (PLACO®, 2022)

- RÉSISTANCE AU FEU DU PISÉ -

Lors de l'extraction de la terre durant le processus de production du pisé, toute terre contenant de la matière organique est mise de côté et ne peut être utilisée. Cela fait que le mélange pour le pisé ne contient aucune matière inflammable. Le pisé est classé A1. *"Un mur porteur en pisé d'une épaisseur de 35 cm est, au minimum, classé RE130."* (CRAterre, 2020)

- ESTHÉTIQUE DU PISÉ -

Finalement, le pisé porte également des qualités dites esthétiques mais qui relèvent en réalité du confort de l'habitant. Le pisé est une matière chaleureuse et réconfortante pour l'Homme. Le pisé offre un environnement sain pour l'habitant de par ses qualités écologiques. Le côté brut de la matière est un élément recherché par certaines personnes envieuses du côté naturel de la matière. (Dethier, 2022)

Les qualités environnementales du pisé sont développées dans la partie suivante avec l'impact environnemental de ce matériau.

- IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE LA MATIÈRE -

"[...] there is no other material which can be recycled time and time again without a loss in quality; which does not release any carbon dioxide in its production; which maintains the perfect indoor humidity and absorbs smells; which creates pleasant acoustics; which can bear structural loads and act as a thermal mass; which has a plethora of aesthetic design possibilities; and which has no negative externalities for humankind in its production process, its implementation, and its maintenance." (Heringer et al., 2019)

Il est plutôt simple à comprendre, suite à l'étalement des connaissances, en quoi le pisé a un impact environnemental positif. Nous allons passer en revue les qualités environnementales de ce matériau et l'impact qu'il peut avoir.

MATIÈRE NATURELLE ET ÉCOLOGIQUE - La terre est une ressource naturelle qui ne pollue pas. Le pisé étant un mélange de terres et d'eau et ainsi un matériau naturel à 100%. C'est un matériau écologique sans autres additifs normalement (sauf cas exceptionnels) et s'il y a des additifs, ils sont souvent d'origine naturelle tel que la paille par exemple. (Dethier, 2022)

ACCESSIBILITÉ - La terre est une ressource accessible partout sur le globe terrestre. Pas toutes les terres sont faites pour faire du pisé comme précisé précédemment mais de façon générale, il est possible de rassembler les terres nécessaires à la composition du pisé plus ou moins à proximité du site. Des exploitations peuvent alimenter un manque d'un certain type de terre (gravier, sable ou autre) nécessaire à une bonne granulométrie du pisé. (Dethier, 2022)

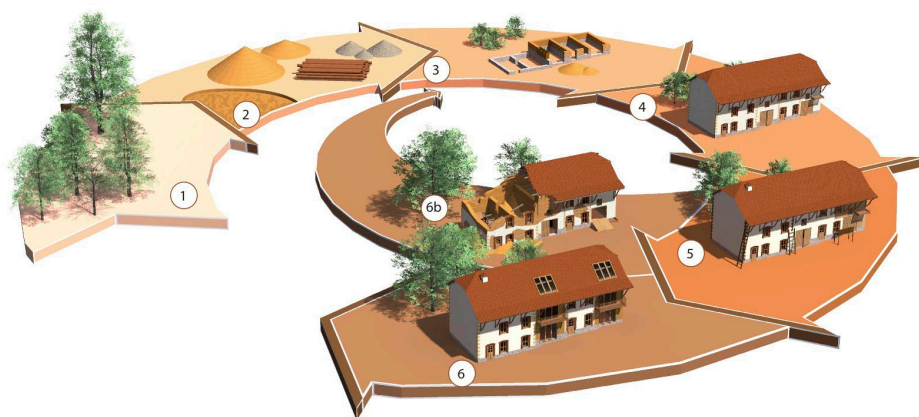


FIGURE 2.17 - Cycle de vie du pisé
(Dorastuder, s. d.-b)

L'accessibilité de ce matériau se fait également par sa facilité de mise en œuvre dans le sens où l'auto-construction est possible. Le processus de production du pisé évoque souvent le workshop ou le chantier participatif, permettant ainsi d'apprendre par le faire. Cette technique est dite traditionnelle et insinue donc la transmission des connaissances. Ce côté manuel où il est possible de toucher la matière la rend plus accessible à tout un chacun. (Dethier, 2022)

Le bémole actuellement à l'accessibilité de la matière est que le coût de la main d'œuvre qualifiée en la matière est élevé. Construire en pisé est donc, en Europe principalement, actuellement un luxe par le prix de la mise en œuvre d'une telle construction.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE - Le processus de production du pisé ne consomme peu voir pas d'énergies grises³.

Petite information complémentaire : *Martin Rauch* économise plus d'énergie grise lors de la création de sa maison individuelle. Il utilise les terres extraites directement sur place et tous les autres matériaux sont trouvés à proximité du site, évitant ainsi de trop transporter les matériaux. (Boltshauser Architekten, 2022) Cette référence architecturale est développée plus tard dans le travail.

CIRCULARITÉ DE LA MATIÈRE - Le pisé est réparable, ajustable, recyclable. La terre extraite et utilisée pour la construction retournera à son état naturel en fin de cycle de vie. (Figure 2.17) La terre sert de matière pour la construction en pisé et lorsque le mur en pisé a fini de jouer son rôle, il est possible de déconstruire le matériau afin de retrouver la matière première. Cette matière peut à nouveau être utilisée ou restituée à la terre. En résumé, la terre peut être recyclée à l'infini. (Dethier, 2022)

3 L'énergie grise d'un matériau regroupe toute la consommation d'énergie dite cachée : l'extraction, le transport, l'assemblage, la destruction, etc. La consommation d'énergie grise est la consommation globale du matériau de sa production à sa destruction, sans prendre en compte le matériau lui-même. (Énergies & Énergies, 2014)

III. QUESTIONNEMENTS

Nous avons constaté le problème de l'utilisation du béton dans le monde de la construction puis remarqué qu'il pourrait y avoir des alternatives au béton. Après avoir précisé le choix du pisé comme alternative, nous avons développé les connaissances de la matière terre.

Ces connaissances conduisent à la réflexion sur la façon de construire en pisé pour que celui-ci puisse être une bonne alternative au béton.

Les questionnements qui subsistent sont désormais les suivant :

Comment favoriser le retour de la matière terre dans la construction?
Comment construire en pisé pour que ce matériau puisse être une bonne alternative au béton ? Dans quels cas de figure le pisé peut-il jouer un meilleur rôle que le béton en construction ? Le pisé peut-il, finalement, être une bonne réponse à la problématique de la matérialité dans le domaine de la construction?

IV. ANALYSE DE RÉFÉRENCES

- CHOIX DES RÉFÉRENCES -

Nous allons maintenant mettre en place une méthodologie d'analyse de références architecturales en pisé afin de comprendre le détail technique de la matière mise en œuvre et son utilisation.

Des coupes techniques reprennent des éléments structurellement importants tels que : le raccord au sol, le raccord au plancher (s'il y en a), le raccord au châssis et le raccord à la toiture. Ces différents raccords visent des points de jonctions de matériaux différents du bâtiment car se sont toujours les points de jonctions qui sont les zones les plus sensibles.

Ce catalogue de référence nous permettra de répondre aux questionnements qui se posent quant à la construction en terre.

Le catalogue de références de constructions en pisé développe des projets situés en Europe qui nécessitent de l'isolation (9), des projets situés en Europe qui n'en nécessitent pas (4), des projets éparpillés sur le globe qui permettront de comprendre ce qui se construit ailleurs (4). Trois autres références non développées du point de vue du détail montrent également l'utilisation du pisé à des fins esthétiques.

Ici, nous analyserons les cinq projets les plus pertinents. Ceux-ci ont été choisis pour leur particularité expérimentale. Les cinq projets sont en l'occurrence des prémices de ce que pourrait être la construction en pisé si celle-ci était plus exploitée. Les autres projets analysés et détaillés se trouvent à la fin en annexe. La plupart des performances acquises dans les autres projets se retrouvent dans l'analyse des cinq projets de référence. (ANNEXE 6 à 20)

- MÉTHODOLOGIE APPLIQUÉE -

Afin d'analyser chaque référence avec la même rigueur, une méthodologie est mise en place. Chaque projet est d'abord nommé, justifié, expliqué, situé et illustré avant d'être analysé minutieusement.

Cette analyse des détails techniques et des particularités qui s'appliquent à chaque projet est faite sur base des connaissances acquises dans la première partie de ce TFÉ. Ces critères d'analyse s'appuient sur les performances et limites du pisé ainsi que l'impact environnemental de la matière lors de l'élaboration du bâti.

Nous porterons une attention particulière aux caractéristiques structurelles, à l'étanchéisation du pisé, à l'isolation thermique des parois, ou encore à la disponibilité et à l'accessibilité de la matière.

Nous n'analyserons pas les références selon les critères de résistance au feu des parois, l'isolation phonique du bâti ou encore la consommation globale d'énergie du bâti par manque de données à ce sujet. De plus, l'esthétique des références ne sera pas jugée car elle reste subjective n'a aucun intérêt constructif.

- RÉFÉRENCES EXPÉRIMENTALES -

- EXPÉRIMENTATION TERRE-À-TERRE -

La première référence est *Haus Rauch*. Cette maison familiale, située à Schlins en Autriche, est conçue par le bureau *Boltshauser Architekten* entre 2004 et 2008. Le client ici est *Martin Rauch*¹ et sa femme *Marta Rauch-Debevec*. *Martin Rauch* permet ici le développement d'une maison expérimentale qui vise à tester les possibilités et les limites du pisé. (Detail, 2009)(FIGURE 4.1)

STRUCTURE ET MATÉRIALITÉ - Les murs sont ici porteurs et tiennent plusieurs étages ainsi que la toiture. (FIGURE 4.2- POINT 4) Le terre excavée sur le site a été utilisée comme matériau de construction, depuis les fondations jusqu'à la toiture, pour les murs porteurs extérieurs ainsi que pour l'aménagement intérieur de la maison (sols, revêtements, cuisine, etc). 85% de la matière excavée sur le site est utilisée.

1 *Martin Rauch* est une référence dans le domaine de la terre crue et particulièrement du pisé. Son bureau d'études *Lehm Ton Erde*, fondé en 1999, explore les possibilités de la matière. *Martin Rauch* expérimente la matière directement dans ses projets. (d'AMC, 2016)



FIGURE 4.1 - (Boltshauser Architekten, 2022)

LÉGENDE

- 1 - Revêtement bitumeux
Isolation de la paroi
Revêtement bitumeux
Mur en pisé
- 2 - Brique verticale de terre stabilisée contre l'érosion
- 3 - Brique horizontale de terre crue stabilisée contre l'érosion
- 4 - Mur porteur en pisé de 45 cm
Isolation de la paroi vers l'intérieur du bâti
- 5 - Chainage dans un mélange de trass et de chaux comme renfort pour supporter la poutre
- 6 - Plancher en bois massif avec revêtement en terre
- 7 - Chassis en bois traité posé sur un linteau de bois également traité contre l'érosion
Isolation de l'ouverture
- 8 - Mélange de trass et de chaux pour renforcer le linteau pour l'ouverture du chassis
- 9 - Toiture comme le plancher en bois massif avec pente créée à base de chutes de terre et de liège mélangés
Couche bitumeuse étanche
Isolation en natte de roseau
Contreplaqué en bois
Couche bitumeuse
Remblai de lave concassée
Brique horizontale de terre cuite stabilisée contre l'érosion

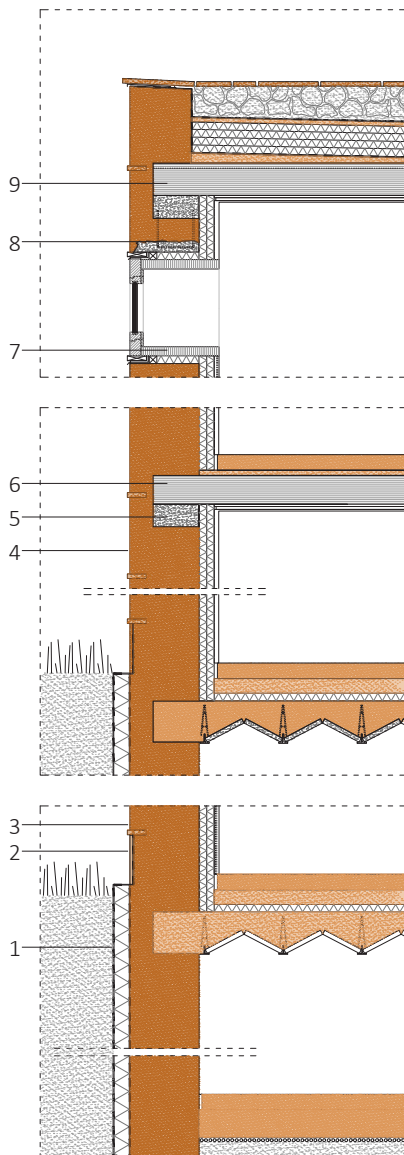


FIGURE 4.2 - Détail technique 1/50 *Haus Rauch* - Boltshauser Architekten, inspiré de la revue *DETAIL* (DETAIL, 2009) (Coole, 2023)

La terre a également été travaillée afin de créer un revêtement étanche pour la terrasse et la toiture, pour des carreaux de céramique et des tuiles décoratives. Les marches d'escalier sont également en terre compactée, renforcées avec du fil d'acier.

La façade non traitée est sujette à une érosion volontaire et contrôlée : des briques d'argile cuites à partie de terre du chantier sont assemblées en murs de terre battue sous forme de bandes horizontales. (Boltshauser Architekten, 2022) (FIGURE 4.2 - POINT 3)

RACCORD SOL - Le caractère expérimental de ce projet permet à *Martin Rauch* de tenter l'utilisation du pisé en dessous du niveau 0. La paroi en pisé est ainsi partiellement enterrée. Pour la réalisation d'une telle paroi, *Martin Rauch* vient isoler le mur en pisé depuis l'extérieur et ajoute une couche bitumeuse d'étanchéité qui englobe le bâti immergé. (FIGURE 4.2 - POINT 1&2) Le sous-sol est fait en terre pisée et scellée avec une couche de bitume.

Cette couche remonte à la surface et vient se glisser derrière une brique de terre stabilisée, posée verticalement le long du mur. Cela permet d'éviter toute remontée d'eau par capillarité dans la paroi en pisé.

RACCORD PLANCHER - Le plancher en bois massif est directement inséré dans le mur lors du processus de conception du mur en pisé. Un mélange de trass et de chaux avec chainage horizontal vient s'ajouter au mur en pisé en renfort structurel pour porter le plancher. (FIGURE 4.2 - POINT 5&6)

RACCORD CHASSIS - Le châssis en bois se pose sur l'extérieur du mur en pisé et un linteau en bois est inséré lors de la conception du mur en pisé. Le linteau en bois est renforcé par la présence d'un élément à base du mélange trass-chaux dans le mur en pisé. (FIGURE 4.2 - POINT 8)

RACCORD TOITURE - Au niveau du raccord toiture, le même principe que le plancher est suivi. La différence est qu'une légère pente est créée à base de chutes de terre et de liège mélangé. La toiture est isolée de l'extérieure et étanchéisée. Un remblai vient servir de finition en toiture et une ligne de briques de terre cuite est posée horizontalement.

Ce premier projet, plutôt particulier, met en avant des alternatives constructives au béton tout en prenant en compte les performances et limites du pisé. Le bureau d'architecture fait bien attention aux caractéristiques structurelles

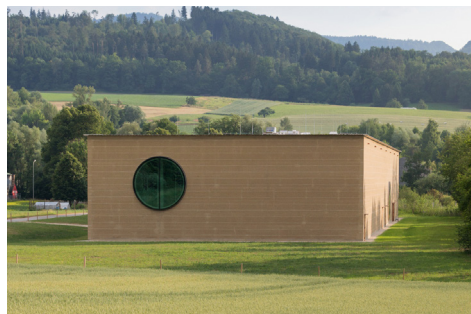


FIGURE 4.3 - (« Ricola Kräuterzentrum in Laufen » , 2015)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton
- 2 - Remontée de l'étanchéité et du soubassement contre la remontée d'eau
- 3 - Mur auto-porteur en blocs de pisé préfabriqués de 45 cm
- 4 - Châssis de fenêtres circulaires sans linteau, double vitrage
- 5 - Mélange de trass et de ciment contre l'érosion
- 6 - Poutre en béton sur colonnes, structure secondaire
- 7 - Joint horizontal entre les blocs préfabriqués
Renforcement à base d'un mélange de trass et de ciment, fixation dans la structure secondaire
- 8 - Toiture en béton
Isolation
Étanchéité bitumeuse
- 9 - Trop-plein évacuation des eaux de toiture
- 10 - Toiture en tôle ondulée d'aluminium

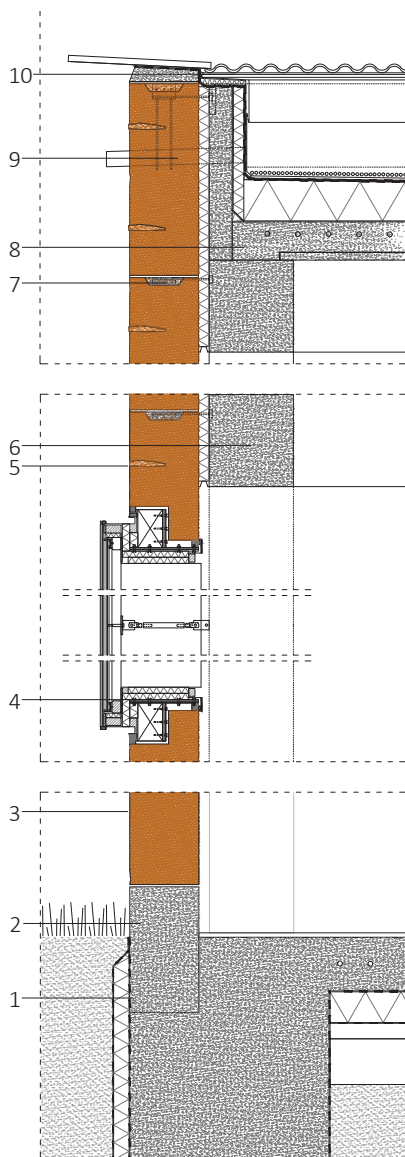


FIGURE 4.4 - Détail technique 1/50 Ricola Kräuterzentrum - Herzog et de Meuron,
inspiré de la revue *DETAIL* (DETAIL , 2015) (Coole, 2023)

du pisé, à son défaut de perméabilité à l'eau, à la nécessité d'une isolation complémentaire. *Martin Rauch* développe de façon plus précise dans son livre *Upscaling Earth*, les particularités de ce bâtiment. (Heringer, A., Howe, L. B. & Rauch, M. , 2019)

- GRAND MONOLITHE TERREUX -

Le *Ricola Kräuterzentrum* est le bâtiment en pisé le plus grand en Europe pour 29, mètres de large sur 11,8 mètres de long et haut de 11 mètres. (FIGURE 4.3)

Construit en 2014, ce bâtiment est entièrement fait en pisé préfabriqué. Bien que dessiné par le bureau d'architecture *Herzog et de Meuron*², les architectes ont dû travailler en collaboration avec l'expert en construction de terre *Martin Rauch*. Cette construction de terre se trouve à *Laufen*, en Suisse, au milieu d'un paysage de bâtiments industriels. Les matières nécessaires sont excavées à proximité du site dans un rayon de 8 km. Sa conception est faite sur base de la fabrication de Ricola (transformation des herbes, du séchage, de la coupe, du stockage, etc). (Detail , 2015)

STRUCTURE ET MATÉRIALITÉ - La façade en pisé est autoportante et est composée de près de 670 éléments préfabriqués en pisé. Cette façade fait près de 45 cm d'épaisseur et repose sur un squelette en béton armé. (FIGURE 4.4 - POINT 3)

RACCORD SOL - Les fondations et les soubassements de la structure sont fait en béton armé et isolé. Comme pour le cas de figure précédent, le tout est isolé et rendu étanche grâce à une couche bitumeuse posée sur l'extérieur du raccord sol, entre l'isolant et la terre. Cette couche bitumeuse remonte jusqu'au niveau du sol. Le soubassement remonte jusqu'à la première couche de pisé. (FIGURE 4.4 - POINT 1 & 2)

RACCORD CHASSIS - Quatre fenêtres de près de 5,5 mètres de diamètre de formes rondes et sans linteaux ponctuent les façades. (FIGURE 4.4 - POINT 4) La forme ronde permet de jouer avec les caractéristiques structurelles du béton. Rappelons-nous qu'il supporte bien la compression et non la traction. Un châssis de forme ronde supporte bien la compression sans avoir besoin de linteau.

2 Herzog et de Meuron est une agence d'architecture suisse située à Bâle. Les deux architectes Jacques et Pierre sont connus pour le choix exceptionnel de la matérialité dans leurs projets.

RACCORD TOITURE - Le toit est fait de tôle ondulée en aluminium et repose sur la structure poteau-poutre en béton armé. Une plaque est installée au-dessus du mur en pisé afin de le protéger contre la pluie. (FIGURE 4.4- POINT 10) Dans ce cas de figure, la façade est autoportante et le raccord toiture montre simplement que le pisé est bel et bien protégé contre la pluie.

Cette référence nous apporte comment la méthode de préfabrication du pisé fonctionne et la façon dont elle peut être mise en œuvre comme structure autoportante seulement dans des bâtiments de grande envergure. Les architectes jouent également sur l'aptitude de résistance à la compression du pisé avec ces grandes fenêtres sans linteaux. *Martin Rauch* développe de façon plus précise dans son livre *Upscaling Earth*, les particularités de ce bâtiment. (Heringer, A., Howe, L. B. & Rauch, M. , 2019)

- ISOLATION INCORPORÉE À LA FAÇADE -

Nouvellement construit à *Darmstadt*, en Allemagne, le bâtiment d'*Alnatura* a marqué le monde architectural en termes de durabilité, d'efficacité des matériaux, etc. Conçu entre 2015 et 2019 par *haascookzemmrich STUDIO2050* et construit par *Lehm Ton Erde*, ce projet est fait à base panneaux de pisé préfabriqué. Pour la première fois, une façade en pisé, avec isolation intégrée, est équipée d'un chauffage géothermique mural. Les plafonds en lattes de bois qui recouvrent l'atrium et les bureaux entièrement ouverts sont également innovants. (FIGURE 4.5)(Detail , 2019)

STRUCTURE ET MATÉRIALITÉ - Dans ce cas-ci, le mur extérieur en pisé est autoportant et ne porte pas le reste la structure. Le reste de la structure se divise en 16 portiques en béton-bois alignés. Ces portiques portent étage et toiture.

Petite particularité, ces murs en pisé sont doublés d'une deuxième paroi en pisé intérieure. Celle-ci possède un chauffage mural intégré à la paroi. Entre les deux parois se trouve un isolant particulier : un isolant en gravier de verre. L'isolation est placée directement dans le moule avec la terre et est comprimé en même temps que celle-ci. (FIGURE 4.6 - POINT 3)

De plus, un chauffage mural est directement mis dans le coffrage avec le pisé et l'isolant. Cette technique n'avait encore jamais été testée auparavant.

RACCORD SOL - Les fondations et soubassements du bâtiment sont en béton armé et isolé, comme pour la référence précédente. Une plinthe en



FIGURE 4.5 - (haas cook zemmrich STUDIO2050, s. d.)

LÉGENDE

1 - Fondations et soubassement en béton
2 - Plinthe extérieure cachant la remontée de l'étanchéité

Remontée de l'étanchéité et du soubassement contre la remontée d'eau

3 - Mur porteur en blocs de pisé préfabriqués de 38 cm

Isolation intermédiaire en gravier de verre

Panneaux préfabriqués de pisé avec chauffage mural intégré de 14cm

4 - Mélange de trass et de ciment contre l'érosion

5 - Dalle de plancher en béton armé avec revêtement

6 - Plaque d'ancrage de la salle dans une poutre horizontale en béton armé

7 - Poutre isolante armée

8 - Mur porteur en blocs de pisé préfabriqués de 38 cm d'épaisseur

Isolation intermédiaire en gavier de verre

Poutre en bois lamellé-collé

9 - Toiture en aluminium à joints debout

Gaines et ventilation

Toiture en bois avec isolation en laine minérale

Pare-vapeur seulement sous la toiture

10 - Gouttière d'évacuation des eaux de toiture

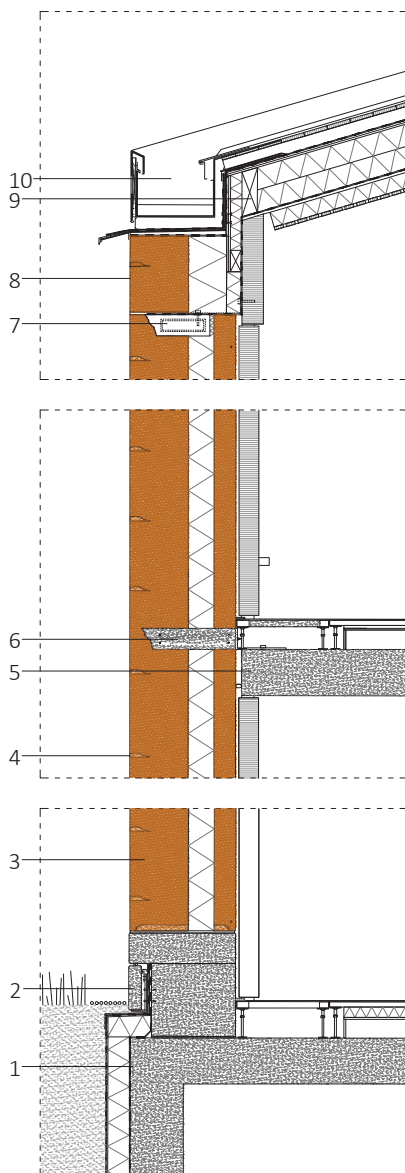


FIGURE 4.6 - Détail technique 1/50 *Alnatura - Haascookzemmrich STUDIO2050*, inspiré de la revue *DETAIL* (DETAIL, 2019) (Coole, 2023)

béton est fixée sur le devant du soubassement et cache la remontée de l'étanchéité. (FIGURE 2.2)

RACCORD PLANCHER - Au niveau du plancher, celui-ci ne vient pas s'imbriquer dans les murs en pisé. Le plancher est raccordé à une poutre horizontale en béton armé grâce à une plaque d'ancrage.

RACCORD CHASSIS - Dans ce projet, les architectes ont décidés de garder le pisé comme étant une masse volumiques et non une paroi qu'il est possible de perforer. Ils ont ainsi décidé que les ouvertures principales se feraient sur les deux façades est et ouest. Les autres ouvertures se font entre deux parois posées côte à côte. (FIGURE 4.5)

RACCORD TOITURE - Au niveau de la toiture, celle-ci est supportée par les portiques. Le mur en pisé reste tout de même protégé de la pluie par une gouttière très large et un casse-gouttes.

L'élément principal à retenir ici est la façon dont les blocs de pisé préfabriqués sont conçus et comprimés. Cela n'avait jamais été fait.

- JEU D'ÉPAISSEUR -

Le *centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen* est situé en France et a été conçu en 2014 par *Nuncs Architectes*. Les terres utilisées pour ce projet sont issues d'un site d'excavation situé à 5 km du centre d'interprétation du patrimoine archéologique. Le choix de la terre ici fait référence au patrimoine de la région et aux techniques constructives utilisées pour le pisé. Cette référence est retenue du point de vue structurelle du mur en pisé. (Nunc architectes, 2022) (FIGURE 4.7)

STRUCTURE ET MATÉRIALITÉ - Les murs en pisé sont porteurs et supportent les différents étages ainsi que la toiture. Le mur porteur varie de 60 cm à 40 cm. Un isolant de granules de lièges est ajouté entre la paroi extérieure en pisé et le mur porteur intérieur. La volonté est réellement de séparer le mur porteur de la façade extérieure afin d'avoir une meilleure stabilité et de laisser la façade extérieure subir à elle-seule les aléas de la nature (pluie et vent). Cette façade extérieure est directement accrochée au mur en pisé porteur à l'aide de chevilles métalliques. (Nunc architectes, 2022) (FIGURE 4.8- POINT 2)

Une double peau de verre sur la face sud du bâtiment permet de préchauffer



FIGURE 4.7 - (Nunc architectes, 2022)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton
- 2 - Façade non-portante en blocs préfabriqués
Isolant en liège
- 3 - Équerre entre la paroi extérieure et la paroi intérieure
- 4 - Support de plancher en béton avec chaînage horizontal
- 5 - Dalle de plancher en bois
- 6 - Façade non-portante fixée sur un mur à ossature bois à l'aide d'équerres
- 7 - Habillage de la gouttière en zinc
- 8 - Support de coyau
- 9 - Toiture en surlattage de bois apparent avec profilés métalliques
- Étanchéité
- Isolation
- Pare-vapeur
- Revêtement intérieur

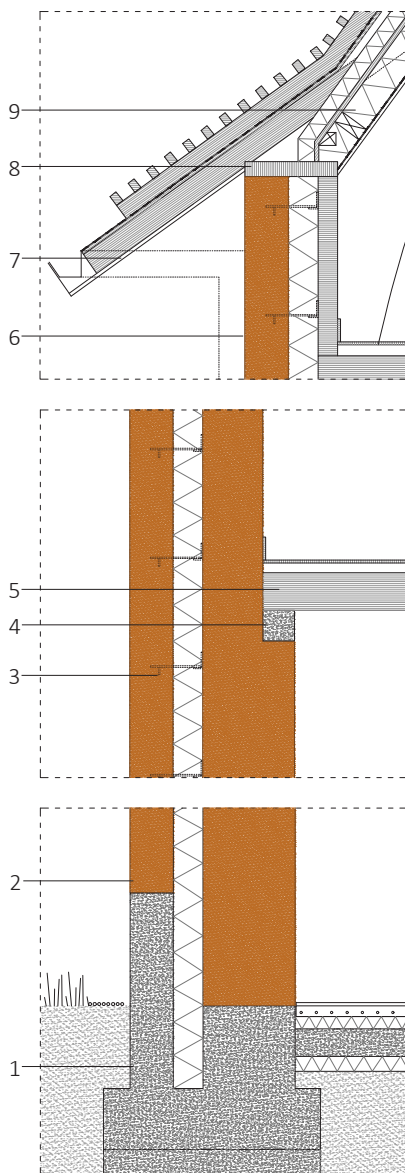


FIGURE 4.8 - Détail technique 1/50 *Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen - NUNC*, inspiré du dessin technique du bureau NUNC (Nunc architectes, 2022)
(Coole, 2023)

le pisé, stockeur d'énergie, en hiver ou lors de la mi-saison.

RACCORD SOL - La façade en pisé et tout le reste de la structure reposent ici sur une fondation en béton. Cette fondation sert également de soubassement et a été préfabriquée sur mesure afin d'empêcher toute infiltration d'eau. L'élément en béton prend ainsi cette forme atypique avec un bras plus long sur l'extérieur et plus court sur l'intérieur. Cette remontée a également été conçue afin d'être à niveau avec le léger dénivelé du site existant. (FIGURE 4.8 - POINT 1)

RACCORD PLANCHER - L'épaisseur du mur varie pour pouvoir porter les planchers des deux étages. Ces planchers reposent sur une poutre en béton armé. (FIGURE 4.8 - POINT 4&5)

RACCORD TOITURE - La toiture du bâtiment est ici en pente et repose directement sur la structure portante. Au dernier étage, le mur porteur en pisé laisse place à une ossature bois. Un support de coyau sert de pièce de transition entre la toiture et le mur. (FIGURE 4.8 - POINT 8&9)

L'intérêt ici est de comprendre comment un mur porteur peut changer de forme et varier d'épaisseur afin de porter correctement les étages. Le soubassement en béton préfabriqué est également intéressant par sa forme atypique.

- PRÉFABRIQUÉ ARCHÉ -

L'immeuble de bureaux *l'Orangerie* est construit en 2019 en pisé préfabriqué par *Clément Vergély*, à Lyon. (FIGURE 4.9) Pour l'élaboration de ces blocs préfabriqués, Le bureau *Vergély architectes* fait appel à *Nicolas Meunier*³. Pour une hauteur de 11 mètres et une surface 1000m², la construction de ce bâtiment est une vraie performance. Toutes les terres utilisées sont originaires de la région dans un rayon de 30km du site du projet. (Vergély architectes, 2021)

Pour la conception de ce bâtiment, les capacités hygrothermiques et acoustiques de la terre sont utilisées à leur plein potentiel. Grâce à ces capacités, il n'est pas nécessaire d'isoler les façades du bâtiment. (Lyon Confluence, s.d.)

Nicolas Meunier utilise pour la réalisation de ces blocs préfabriqués, une

3 Nicolas Meunier est un entrepreneur spécialisé dans le pisé. Il développe en 1986 une machine portable pour la fabrication de blocs de pisé préfabriqués en France. L'intention était de proposer une continuité à la technique traditionnelle du pisé quant aux techniques modernes de construction. (Le Pisé, s. d.)



FIGURE 4.9 - (Vergely architectes, 2021)

LÉGENDE

- 1 - Fondations en béton
- 2 - Soubassement en pierre naturelle
- 3 - Mur en pisé porteur de 85cm à la base et 50cm en haut
- 4 - Poutre horizontale en bois comme structure secondaire
- 5 - Chassis en bois entre les ossatures bois
- 6 - Chassis en bois entre les ossatures bois, passant derrière les voûtes de pisé
- 7 - Poutre en bois
- 8 - Toiture plate isolée et étanche
- 9 - Couvertine en pierre naturelle

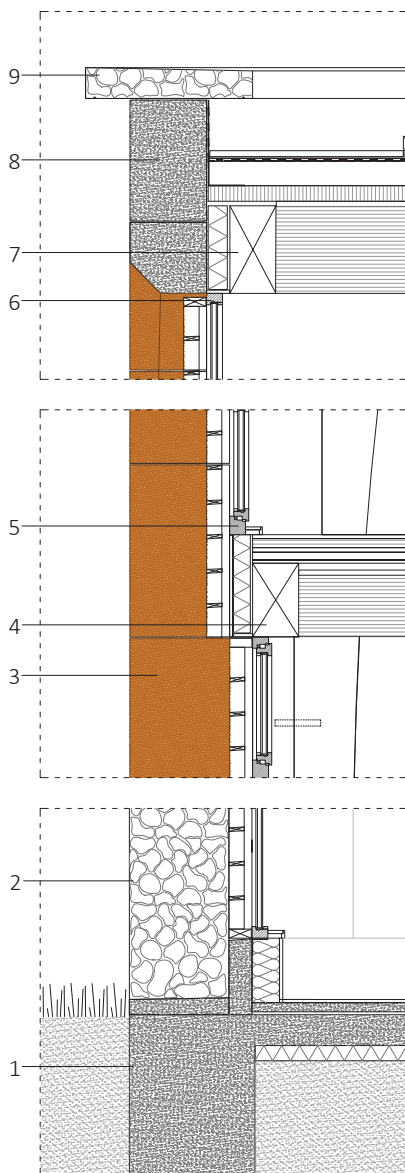


FIGURE 4.10 - Détail technique 1/50 *L'Orangerie* - Vergely Architectes, inspiré des dessins techniques partagés par Clément Vergély (Coole, 2023)

machine portable qu'il amène sur chantier ou la production du pisé à lieu.

STRUCTURE ET MATÉRIALITÉ - Le choix des arches est fait afin de profiter pleinement des capacités résistantes de la terre, comme dit précédemment, le pisé supporte la pression mais pas la traction ou la flexion. La structure du projet a été une prouesse technique ; la façade en pisé est portante et soutient une structure secondaire en bois sur deux étages ainsi que la toiture. (FIGURE 4.10 - POINT 3) C'est ici une combinaison de deux matériaux qui fait que ce bâtiment tient.

286 blocs individuels de pisé préfabriqués ont été nécessaires à la construction de ce bâtiment. La fabrication de ces blocs préfabriqués est totalement novatrice du fait que les éléments sont courbés et suivent une certaine logique d'assemblage.

Tout le reste de la structure est en bois lamellé-collé, venant des Vosges et d'Autriche. (Lyon Confluence, s.d.) (Stripping, 2022)

RACCORD SOL - Le soubassement est fait à base de blocs de pierre naturelle et non de béton dans ce cas-ci. Les blocs de pisé sont directement posés sur ce socle en pierre. Les fondations sont en béton. (FIGURE 4.6 - POINT 2)

RACCORD PLANCHER - L'épaisseur de la façade varie entre 85 et 50cm. La base étant plus épaisse que le haut afin de pouvoir porter les planchers en bois. (FIGURE 4.6 - POINT 4)

RACCORD CHASSIS - Les châssis n'interfèrent pas avec la façade en pisé car ils sont placés dans la structure en bois et non directement dans la paroi en pisé. (FIGURE 4.6 - POINT 5&6)

RACCORD TOITURE - L'acrotère est fait de béton mais la couvertine est en pierre naturelle de la région tout comme la pierre du soubassement du bâtiment. (FIGURE 4.6 - POINT 7,8&9)

Nous retenons de ce bâtiment la prouesse technique des blocs de pisé préfabriqués sur mesure pour la création des arches. Comme la référence précédente, le jeu d'épaisseur du pisé est intéressant. Une autre chose remarquable est l'utilisation d'un soubassement en pierre et non en béton armé comme pour les autres références analysées.

V. RÉSULTATS

L'analyse de ces références ainsi que la compréhension de celles formant le catalogue nous permettent d'assimiler la technique du pisé jusqu'à sa réalisation lors d'un projet architectural.

De façon générale, nous avons pu observer l'évolution de la technique du pisé. Bien que la matière reste la même, la technique traditionnelle du pisé s'est développée et continue encore. Les architectes poussent l'utilisation de la matière avec de nouvelles techniques de construction bien plus actuelles. Le pisé suit ainsi un mouvement évolutif.

Nous avons également pu remarquer que le pisé fonctionne en adéquation avec d'autres matériaux et non de façon autonome comme nous aurions pu le penser. Les architectes profitent des performances et lorsque la limite du pisé est atteinte, un changement de matériau est effectué.

Finalement, l'utilisation structurelle du pisé varie principalement en fonction de la taille du bâtiment et de ses proportions. Des formes simples sont utilisées pour les constructions en pisé et ces formes jouent avec les qualités constructives du pisé.

Nous allons maintenant détailler les résultats observés.

VI. DISCUSSION

Afin de structurer la discussion émanant des constatations et des analyses faites, nous allons parler de l'évolution de la technique du pisé, de l'utilisation équilibrée de matériaux et de formatage de la matière.

- ÉVOLUTION D'UNE TECHNIQUE -

La technique du pisé évolue constamment et les limites d'utilisation de la matière sont explorées et sans cesse repoussées un peu plus loin. Les chercheurs, les architectes, les ingénieurs, etc, étudient la terre en s'inspirant des constructions passées afin de remettre cette méthode à l'ordre du jour.

- TECHNIQUE TRADITIONNELLE REVITALISÉE -

La pratique de l'utilisation du pisé a pris un premier tournant par l'accès à la préfabrication de ce matériau. Cette préfabrication ouvre les portes à une production à plus grande échelle et vise l'efficacité de la mise en œuvre de la matière terre. La préfabrication rend cette méthode constructive plus accessible à tout un chacun.

La technique prend ensuite un tournant grâce à la possibilité de contrôler le mélange à pisé, c'est-à-dire contrôler la granulométrie de la matière et procéder à un mélange visant la haute performance. Anciennement, la terre était prise telle qu'elle était trouvée et mélangée à de l'eau et d'autres adjuvants d'origine végétales si nécessaire mais la terre restait la même. De nos jours avec les techniques performantes de contrôle, il est possible de fabriquer un pisé de plus en plus performant et approprié à la construction actuelle. La construction actuellement est très réglementée et il est difficile de faire intervenir de la nouveauté. Pourtant le pisé réussit à faire ses preuves et les recherches de performances continuent.

La façon de compacter la matière terre a également évoluée. Le compactage qui était manuel est aujourd'hui devenu mécanique. Comme précisé précédemment, la terre doit être compactée afin que le pisé soit résistant. Le fait de mécaniser cette étape permet d'avoir un mur plus compact et ainsi plus solide (porteur) et pourquoi pas plus isolant.

Finalement, la création de bandes horizontales anti-érosion dans les murs permet de repousser la durée de vie de la matière si elle est utilisée dans certains climats pluvieux. Ces bandes de pierres, de ciment, de tuff volcanique, de terre cuite ou autres sont totalement innovantes. Elles ne rendent pas la structure imperméable mais permettent toutefois de ralentir l'érosion et donc de contrôler une des limites du pisé.

Ainsi, la préfabrication, le contrôle de la granulométrie, la mécanisation du compactage et la création de bande horizontale anti-érosion repoussent les limites de la matière et permettent d'augmenter les performances de ce matériau sur différents niveaux : structurel, perméabilité de la matière, etc.

- ÉVOLUTION DE NOTRE MANIÈRE DE PENSÉE -

Qui dit évolution dans la manière de faire dit également évolution dans la manière de penser. Il est de notre responsabilité d'avoir une pensée réflexive, non seulement en architecture, mais de façon générale, sur la façon de construire de manière écoresponsable.

- MIXITÉ MATÉRIELLE -

Le pisé ne fonctionne pas seul. Il doit être complémentaire à d'autres matériaux pour différentes raisons qui sont plutôt claires.

Le pisé ne peut pas être utilisé pour des planchers ou toiture sans autre support horizontale porteur. La terre peut tout de même servir de revêtement intérieur au niveau de la dalle de sol et ainsi remplir ses fonctions mais non structurelles.

Le matériau ne peut pas être en contact direct avec la terre et l'humidité et nécessite ainsi fondations et soubassements d'une autre nature. Globalement, tous les projets respectent le dicton : *"Les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau »*.". (ALTE 96 & ALEC Lyon, 2022) Lorsque le pisé veut être utilisé dessous le niveau 0, il est possible d'étanchéiser, d'isoler, de mettre un pare-vapeur sur l'extérieur de la façade afin d'éviter toute intrusion

d'eau ou de ponts thermiques avec le reste du bâti.

Le pisé ne permet pas la création d'ouvertures classiques, de forme rectangulaire, sans linteau et nécessite alors l'intervention d'un autre matériau pouvant supporter ce type de charges. Il est tout de même possible de jouer avec les limites structurelles de la matière en jouant avec des ouvertures volumétriquement intéressantes (ronds, arches, etc), permettant au pisé de garder ses propriétés mécaniques.

De façon générale ici l'intérêt est de savoir utiliser le bon matériau au bon endroit.

- VOLUMÉTRIE DU PISÉ -

Les possibilités volumétriques de la matière ne sont pas énormes et pourtant le pisé permet de plus en plus de formes. De façon générale, il faut privilégier l'utilisation de volumes pleins de pisé sur des petites portées si celui-ci est porteur de la structure. Pour des plus grands bâtiments, le pisé ne suffit pas et doit être accompagné d'une structure principale dans un autre matériau.

Le pisé pour un bâti de grande envergure pourrait servir de mur porteur et être accompagné d'un deuxième matériau porteur également. Une structure mixte pourrait ainsi soutenir des bâtiments plus grands.

Ainsi l'utilisation de ce matériau, porteur à lui seul, peut être valorisé dans des petits bâtis tels que des logements individuels ou encore des équipements de petite taille. Le matériau pourrait également être accompagnateur d'une structure principale pour des équipements plus grands ou des logements plus grands.

VII. CONCLUSION

Ce TFÉ avait pour but de répondre aux questionnements qui se posaient autour de la construction en pisé.

Comment favoriser le retour de la matière terre dans la construction ?
Comment construire en pisé pour que ce matériau puisse être une bonne alternative au béton ? Dans quels cas de figure le pisé peut-il jouer un meilleur rôle que le béton en construction ? Le pisé peut-il, finalement, être une bonne réponse à la problématique de la matérialité dans le domaine de la construction ?

Nous sommes passés par la déconstruction du matériau : de sa composition à sa technique de construction avant de continuer sur ses limites et ses performances. Ceci nous a permis d'entrevoir la possibilité d'utiliser ce matériau comme alternative au béton dans le domaine de la construction.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la construction même en pisé ainsi qu'à sa mise en œuvre dans un contexte contemporain en analysant une série de références expérimentales en pisé. Ces analyses nous ont habilités à répondre à la question de comment construire en pisé pour que celui-ci soit considéré comme une bonne alternative dans certains cas précis. Elles nous ont permis de comprendre dans quels cas le pisé pourrait être une réponse plus écoresponsable à la problématique de la matérialité dans le domaine de la construction.

Pour conclure, le pisé pourrait être une alternative plus responsable au béton mais la véritable leçon à retenir est que s'il est encore question de construire, il faut désormais apprendre à favoriser l'utilisation du bon matériau à sa juste place.

BIBLIOGRAPHIE

42JEROME. (2007). Résistance thermique du pisé. futura. <https://forums.futura-sciences.com/habitat-bioclimatique-isolation-chauffage/190476-resistance-thermique-pise.html>

AA', A. (2020). Pisé porteur, par Clément Vergély | L& # 039 ; Architecture d& # 039 ; Aujourd& # 039 ; hui. L'Architecture d'Aujourd'hui. <https://www.larchitectureaujourd'hui.fr/64948/>

ADMIN. (2023). Cité Nollez | Dechelette Architecture. Dechelette Architecture | Agence d'architecture. <http://www.dechelette-architecture.com/cite-nollez/>

AECCDOC. (2020). La roue des techniques. CRAterre. <https://craterre.hypotheses.org/3917>

AFP. (2021). Le béton-ciment, troisième « pays » des émissions de gaz à effet de serre. Geo.fr. <https://www.geo.fr/environnement/le-beton-ciment-troisieme-pays-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-206744>

ALTE 96 & ALEC Lyon. (2022). Le pisé et la rénovation énergétique. alte69. https://alte69.org/media/filer_public/70/a7/70a7696c-53e0-4ad5-9749-e5a329a27ec8/fiche_pise.pdf

ARCHITIZER. (2020). Maison Pour Tous by designbuildLAB. <https://architizer.com/projects/maison-pour-tous/>

ARCHITIZER. (2014). Tadashi Saito + Atelier NAVE. <https://architizer.com/firms/tadashi-saito-atelier-nave/>

ARQUIPÉLAGO, FEDERICO CAIROLI · HOUSE IN CUNHA. (s. d.). Divisare. <https://divisare.com/projects/424356-arquipelago-federico-cairoli-house-in-cunha>

ASTERRE. (2018). Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue. Consulté le 19 mai 2023, à l'adresse https://www.asterre.org/media/pages/la-terre-crue/matiere-et-architecture/comment-construire-en-terre/le-pise/20e22c97ac-1668082404/gbp_pise_2018_web.pdf

ATELIER RÉGIS ROUDIL. (2022). Crèche 24 berceaux. <https://www.regisroudil.fr/projet/creche-de-lalma/#lg=parent&slide=4>

BATIWEB. (2020). Le pisé, ce matériau ancien aux normes écologiques modernes. Batiweb. <https://www.batiweb.com/actualites/developpement-durable/le-pise-ce-materiau-ancien-aux-normes-ecologiques-modernes-34583>

BC-AS. (s. d.). Maison de chasse | bc-as. <https://bc-as.org/projects/maison-de-chasse>
BERKOWICZ, M. (s. d.). Pisé : qu'est-ce que c'est ? Futura. <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/architecture-pise-17869/>

BLAANC | ARQUITECTURA. (2015). Casa da Vinha. <https://www.blaanc.com/casa-da-vinha.html>

BLOCH, G. (2008). Innovation et Technologie. Le béton devient toujours plus résistant, moins polluant et s'auto-nettoie. Le Temps. <https://www.letemps.ch/economie/innovation-technologie-beton-devient-toujours-plus-resistant-polluant-sautonettoie>

BOLTSHAUSER ARCHITEKTEN. (2022). Haus Rauch & ; Boltshauser Architekten AG. Boltshauser Architekten AG. <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>

BOLTSHAUSER ARCHITEKTEN. (2010). Lehmhaus Rauch. Architonic. <https://www.architonic.com/de/project/boltshauser-architekten-lehmhaus-rauch/5100620>

BUTTIN, G. (2020). Le béton, mis au défi des enjeux environnementaux. durable. Consulté le 18 mai 2023, à l'adresse https://cdurable.info/IMG/pdf/de_cryptage_n_27_le_be_ton_mis_au_de_fi_des_enjeux_environnementaux-vf.pdf

CABALLERO, P. (2022). House in Cunha / Arquipelago Arquitetos. ArchDaily. https://www.archdaily.com/937646/house-in-cunha-arquipelago-arquitetos?ad_source=myad_bookmarks&ad_medium=bookmark-open

CALCULIS. (s. d.). Calculer la résistance thermique d'une paroi. <https://calculis.net/resistance-thermique>

CARDENAS, D. (2019). Casa vernácula del siglo XXI / Edra arquitectura km0. ArchDaily en Español. <https://www.archdaily.cl/cl/792766/casa-vernacula-del-siglo-xxi-edra-arquitectura-km0>

COGLEY, B., & COGLEY, B. (2020). Arquipelago Arquitetos builds low-slung Brazilian house with rammed earth. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2020/08/05/house-in-cunha-arquipelago-arquitetos-rammed-earth/>

COMBE, M. (2022,). La pénurie de sable, c'est pour bientôt ! (Infographie). Natura Sciences. <https://www.natura-sciences.com/comprendre/penurie-sable.html>

CONCEPTION, A., & CONCEPTION, A. (2023). Architecture du futur, quels enjeux ? a3a CONCEPTION. <https://a3aconception.fr/architecture-du-futur-enjeux/>

CRATERRE. (2006). *L'encyclopédie de la construction en terre : Traité de construction en terre (Vol. 1)*. Parentheses Eds.

CRATERRE. (2020). *Construire en pisé : Prescriptions de dimensionnement et mise en oeuvre*. Le Moniteur éditions.

D'AMC, L. R. (2016). Martin Rauch, céramiste et ingénieur - AMC. <https://www.amc-archi.com/article/martin-rauch-ceramiste-et-ingenieur,4572>

DELBRAYELLE, M. (s. d.). Les différents climats sur Terre | Techno JR. <https://technojr.fr/les->

différents-climats-sur-terre/

DETAIL. (2003). *Cemetery Extension with Chapel in Batschuns*. DETAIL inspiration.

DETAIL. (2019). *Lehmbau im Grossformat*. DETAIL inspiration.

DETAIL. (2015). *Ricola Kräuterzentrum in Laufen*. DETAIL inspiration.

DETAIL. (2011). *Schwimmbad in Toro*. DETAIL inspiration.

DETAIL. (2015). *Visitor Centre of the Swiss Ornithological Institute in Sempach*. DETAIL inspiration.

DETAIL. (2009). *Wohnhaus in Schlins*. Detail inspiration.

DETHIER, J. (2022). *Habiter la terre - l'art de bâtir en terre crue*. Flammarion.

DIALOG. (s. d.). NK'Mip Desert Cultural Centre | DIALOG. <https://dialogdesign.ca/projects/nkmip-desert-cultural-centre/>

DIALOG. (2021). NK'Mip Desert Cultural Centre / DIALOG. ArchDaily. https://www.archdaily.com/508294/nk-mip-desert-cultural-centre-dialog?ad_source=myad_bookmarks&ad_medium=bookmark-open

DIVISARE. (s. d.). : mlzd, Visitor Centre at the Swiss Ornithological Insitute. Divisare. <https://divisare.com/projects/318948-mlzd-architekten-visitor-centre-at-the-swiss-ornithological-insitute>

DL ATELIER. (2021). SanBaoPeng Art Museum / DL Atelier. ArchDaily. https://www.archdaily.com/882468/sanbaopeng-art-museum-dl-atelier?ad_source=myad_bookmarks&ad_medium=bookmark-open

DORASTUDER. (s. d.-a). le bâti en pisé : histoire, architecture et enjeux - osmiaarchitecture. osmiaarchitecture. <http://osmiaarchitecture.com/la-construction-en-pise/le-bati-en-pise/>

DULAC, P. (s. d.). Synonymo. synonymo.fr. <http://www.synonymo.fr/>

EDRA ESTUDIO DE ARQUITECTURA. (2021). Casa de Tapia. <http://arquitectura.edraculturaynatur.com/portfolio-item/casa-de-tapia/>

ÉNERGIES, C. D., & ÉNERGIES, C. D. (2014). Qu'appelle-t-on l'énergie « grise » ? Connaissance des Énergies. <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quappelle-t-lenergie-grise>

EPFL. (2017). PISÉ – Tradition et potentiel. Consulté le 19 mai 2023, à l'adresse <https://www.epfl.ch/campus/art-culture/museum-exhibitions/archizoom/fr/pise1/>

FASFOX. (2022). Empreinte carbone du béton : origines et conséquences. Concrete Dispatch. <https://www.concretedispach.eu/blog/empreinte-carbone-beton/>

GUIDEBETON.COM. (s. d.). La composition du béton- GuideBeton.com. <http://www.guidebeton.com/composition-beton>

HAAS COOK ZEMMRICH | STUDIO2050 Alnatura Campus. (s. d.). <https://www.haascookzemmrich.com/de/projekte/alnatura-campus/>

HEITZ, P., MOREL, J.-C., FABBRI, A., SOUDANI, L., CHAMPIRÉ, F., & MEUNIER, N. (2015). CONSTRUCTION TERRE L'ISOLATION DU PISÉ : PERTINENCE ET PRINCIPES. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/304793124_CONSTRUCTION_TERRE_L'ISOLATION_DU_PISE_PERTINENCE_ET_PRINCIPES

HERINGER, A., HOWE, L. B., & RAUCH, M. (2019). *Upscaling Earth : Material, Process, Catalyst*. GTA Verlag.

HERZOG & DE MEURON. (s. d.). Herzog & de Meuron- 369 Ricola Kräuterzentrum. <https://www.herzogdemeuron.com/projects/369-ricola-krauterzentrum/>

HIS, G. (2015). La matérialité comme récit. BBF- Bultin des Bibliothèques de France. Consulté le 18 mai 2023, à l'adresse <https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2015-04-0030-003.pdf>

JDD. (2016). Casa da Vinha dans un vignoble au Portugal par les architectes de blaanc. Journal du Design. <https://www.journal-du-design.fr/architecture/casa-da-vinha-dans-un-vignoble-au-portugal-par-les-architectes-de-blaanc-77626/>

JOURDA, F. (2011). *Les 101 mots du Développement durable à l'usage de tous*. Archibooks.

LAFARGE FRANCE : CIMENT, BÉTONS, GRANULATS, SOLUTIONS ET PRODUITS. (2023). Histoire du béton. <https://www.lafarge.fr/histoire-du-beton>

LE PISÉ. (s. d.). Construction de maison en pisé, Nicolas Meunier. <http://www.construction-pise.fr/>

LYON CONFLUENCE. (s. d.). Ydéal, une nouvelle nature de ville. <https://www.lyon-confluence.fr/fr/ydeal-une-nouvelle-nature-de-ville>

MARTE.MARTE ARCHITEKTEN. (s. d.). Friedhof Batschuns – Marte.Marte Architekten. <https://www.marte-marte.com/projekt/totenkapelle-batschuns#slide2>

MARTIN RAUCH. (s. d.). Martin Rauch | Lehm Ton Erde, Martin Rauch, Vorarlberg. (s. d.). <https://www.lehmtonerde.at/de/martin-rauch/>

: MLZD. (s. d.). : mlzd- Projects. <https://www.mlzd.ch/projects/auswahl/vos/>

: MLZD. (2022). Visitor Centre at the Swiss Ornithological Institute / : mlzd. ArchDaily. https://www.archdaily.com/769013/visitor-centre-at-the-swiss-ornithological-institute-mlzd?ad_medium=gallery

NUNC ARCHITECTES. (2022). Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen - 67 – nunc architectes. <https://www.nunc.fr/centre-d-interpretation-du-patrimoine-archeologique-de-Dehlingen-67-169>

PLACO®. (2022). Le principe « masse-ressort-masse » en isolation phonique. <https://www.placo.fr/le-principe-masse-ressort-masse-en-isolation-phonique>

PÔLE ÉCO-CONCEPTION. (2014). Guide sectoriel d'éco-conception Matériaux de construction. Consulté le 19 mai 2023, à l'adresse <https://www.eco-conception.fr/data/sources/users/7/docs/2014-01-10-guide-materiaux-de-construction-final.pdf>

Rammed earth house. (2013, 24 juillet). Architizer. <https://architizer.com/projects/rammed-earth-house/>

SÁNCHEZ, D. (2021). Zenkonyu × Tamping Earth (Work in the Setouchi Triennale 2013) / Tadashi Saito + Atelier NAVE. ArchDaily. https://www.archdaily.com/506198/zenkonyu-tamping-earth-tadashi-saito-atelier-nave?ad_source=myad_bookmarks&ad_medium=bookmark-open

STRIPPING, F. S. (2022). *Monumentales Lehmbaurevival in Lyon*. Bauwelt.

THE BEST NEW ARCHITECTS. (2021, 12 juillet). Women's House in Africa - The Best New Architects. The Best New Architects - Searching for the best and new architects. <https://www.thebestnewarchitects.com/womens-house-africa/>

TIMUR ERSEN (s. d.). La Maison Pour Tous, Commune de Four, 2018 / Marché public : Lot pisé. Atelier Timur Ersen - bâtir en terre (pisé)/pierre/bois/paille. <https://www.timurerсен.com/lamaisonpourtouscommunedefour2018lotpis>

UNIVERSALIS, E. (s. d.-a). ARCHITECTURE (Matériaux et techniques) - Terre - Encyclopædia Universalis. Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/architecture-materiaux-et-techniques-terre/>

UNIVERSALIS, E. (s. d.-b). BÉTON, Histoire du béton - Encyclopædia Universalis. Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/beton/1-histoire-du-beton/>

VAN DER LINDEN, J. (2022). Presentatie aardebouw [Diapositives]. Workshop BC Materials, Bruxelles, Belgique.

VANDORMAEL, L., & VANDORMAEL, L. (2019). Le béton, une industrie émettrice de CO₂ : quelles sont les solutions pour des constructions durables ? RTBF. <https://www.rtbef.be/article/le-beton-une-industrie-emettrice-de-co2-quelles-sont-les-solutions-pour-des-constructions-durables-10250934>

VAN ES, K. (2022). Cemetery extension and chapel of rest by Marte.Marte Architects. Ävontuura. <https://www.avontuura.com/cemetery-extension-and-chapel-of-rest-marte-marte-architects/>

VERGELY ARCHITECTES. (2021). Îlot B2- Lyon Confluence- Clément Vergély architectes. Clément Vergély architectes. <http://www.vergelyarchitectes.com/ilot-b2-lyon-confluence/>

VIER. (s. d.). Ficha – Piscina en Toro francés | VIER. <https://vier.es/fr/piscine-toro-info/>

ANNEXES

Les annexes reprennent la totalité du catalogue de références étudiées dans le cadre de *l'Atelier de recherche : synthèse et articulation thématiques Éco-Architectures (LBARC 2236)*. Le catalogue de références met en avant différents projets ayant tous des particularités faites de pisé.

- ANNEXE 1 - EXPÉRIMENTATION TERRE-À-TERRE

NOM	<i>Haus Rauch</i>
LIEU	<i>Schllins, Autriche</i>
TYPE	Maison familiale
ARCHITECTE	<i>Boltshauser Architekten</i>
CLIENT	<i>Martin Rauch & Marta Rauch-Debevec</i>
ANNÉE	2004 - 2008

EXPLICATIONS La maison de *Martin Rauch* est une maison modèle expérimentale qui vise à tester les possibilités et les limites du pisé. Les murs sont porteurs et tiennent plusieurs étages ainsi que la toiture.

La terre excavée sur le site a été utilisée comme matériau de construction, depuis les fondations jusqu'à la toiture, pour les murs porteurs extérieurs ainsi que pour l'aménagement intérieur de la maison (sols, revêtements, cuisine, etc). 85% de la matière excavée sur le site est utilisée. Elle a également été travaillée afin de créer un revêtement étanche pour la terrasse et la toiture, pour des carreaux de céramique et des tuiles décoratives. Les marches d'escalier sont également en terre compactée, renforcées avec du fil d'acier. Le sous-sol est fait en terre pisée et scellée avec une couche de bitume.

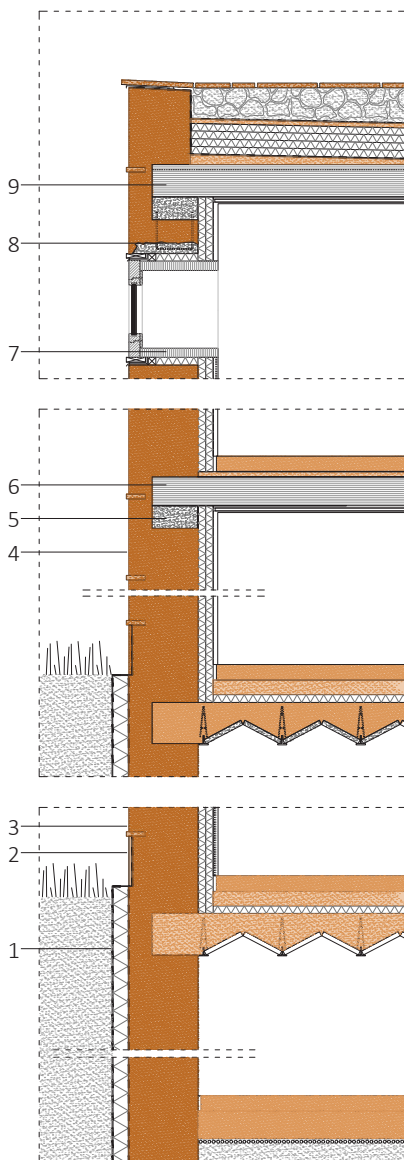
La façade non traitée est sujette à une érosion volontaire et contrôlée : des briques d'argile cuites à partie de terre du chantier sont assemblées en murs de terre battue sous forme de bandes horizontales. (Boltshauser Architekten, 2022)



(Boltshauser Architekten, 2022)

LÉGENDE

- 1 - Revêtement bitumeux
Isolation de la paroi
Revêtement bitumeux
Mur en pisé
- 2- Brique verticale de terre stabilisée contre l'érosion
- 3 - Brique horizontale de terre crue stabilisée contre l'érosion
- 4 - Mur porteur en pisé de 45 cm
Isolation de la paroi vers l'intérieur du bâti
- 5 - Chainage dans un mélange de trass et de chaux comme renfort pour supporter la poutre
- 6 - Plancher en bois massif avec revêtement en terre
- 7- Châssis en bois traité posé sur un linteau de bois également traité contre l'érosion
Isolation de l'ouverture
- 8 - Mélange de trass et de chaux pour renforcer le linteau pour l'ouverture du châssis
- 9- Toiture comme le plancher en bois massif avec pente créée à base de chutes de terre et de liège mélangés
Couche bitumeuse étanche
Isolation en natte de roseau
Contreplaqué en bois
Couche bitumeuse
Remblai de lave concassée
Brique horizontale de terre cuite stabilisée contre l'érosion



Détail technique 1/50 *Haus Rauch - Boltshauser Architekten*,
inspiré de la revue *DETAIL* (Detail, 2009)

- ANNEXE 2 - GRAND MONOLITHE TERREUX

NOM	<i>Ricola Kräuterzentrum</i>
LIEU	<i>Laufen, Suisse</i>
TYPE	Entrepot de fabrication de Ricola
ARCHITECTE	<i>Herzog et de Meuron</i>
CLIENT	Ricola
ANNÉE	2013-2014

EXPLICATIONS Le bâtiment Ricola est le bâtiment en pisé le plus grand en Europe pour 29, mètres de large sur 11,8 mètres de long et haut de 11 mètres. La façade en pisé est autoportante et est composée de près de 670 éléments préfabriqués en pisé. Cette façade fait près de 45 cm d'épaisseur et repose sur un squelette en béton armé (soubassements).

Les matières nécessaires sont excavées à proximité du site dans un rayon de 8 km.

Pour ce qui est de la question de l'érosion (vent et pluie), il faut savoir qu'un mortier de trass composé de tuf volcanique et de chaux est compacté toutes les huit couches de terre dans le coffrage afin de lutter contre celle-ci, c'est-à-dire tous les 65cm environ.

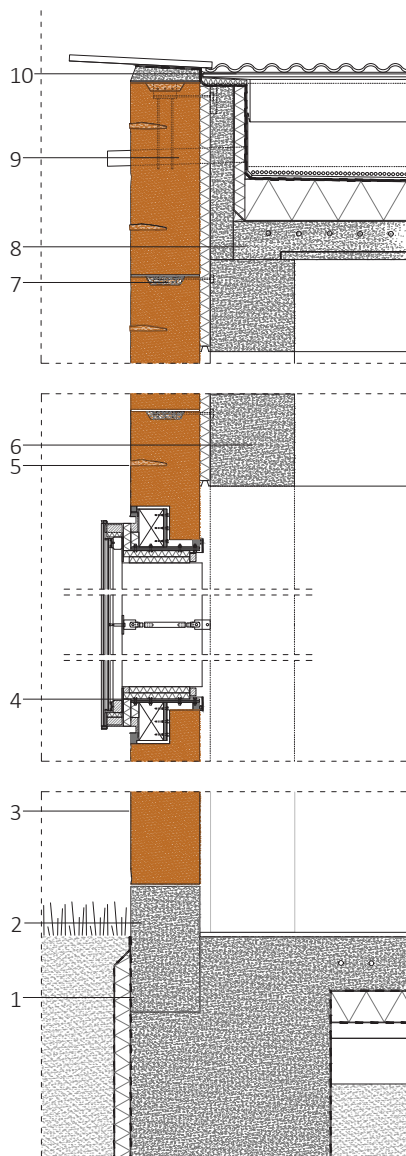
Quatre fenêtres de près de 5,5 mètres de diamètres de formes rondes et sans linteaux ponctuent les façades. Le toit en béton, isolé, repose quant à lui sur une série de poteaux structurant l'intérieur du bâtiment. (369 Ricola Kräuterzentrum – Herzog & de Meuron, s. d.)



(Detail, 2015)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton
- 2 - Remontée de l'étanchéité et du soubassement contre la remontée d'eau
- 3 - Mur auto-porteur en blocs de pisé préfabriqués de 45 cm
- 4 - Châssis de fenêtres circulaires sans linteau, double vitrage
- 5 - Mélange de trass et de ciment contre l'érosion
- 6 - Poutre en béton sur colonnes, structure secondaire
- 7 - Joint horizontal entre les blocs préfabriqués
Renforcement à base d'un mélange de trass et de ciment, fixation dans la structure secondaire
- 8 - Toiture en béton
Isolation
Étanchéité bitumeuse
- 9 - Trop-plein évacuation des eaux de toiture
- 10 - Toiture en tôle ondulée d'aluminium



Détail technique 1/50 *Ricola Kräuterzentrum* - Herzog et de Meuron,
inspiré de la revue *DETAIL* (Detail, 2015)

- ANNEXE 3 - ISOLATION INCORPORÉE À LA FAÇADE

NOM	<i>Alnatura</i>
LIEU	<i>Darmstadt, Allemagne</i>
TYPE	Bâtiment de bureaux
ARCHITECTE	<i>Haascookzemmrich STUDIO2050</i>
CLIENT	<i>BGG Grünzig Ingenieurgesellschaft - Bad Homburg</i>
ANNÉE	2015-2019

EXPLICATIONS Ce projet est fait à base panneaux de pisé préfabriqué de grande taille : 3,5 mètres de larges sur 1 mètre de haut pour une épaisseur de 69 centimètres (isolation intégrée). Cette couche d'isolation intégrée est composée de graviers de verre cellulaire recyclé. Elle est directement compactée dans le même moule que le pisé lors de la préfabrication de celui-ci. Un mortier de trass composé de tuf volcanique et de chaux est également compacté tous les 30-60 centimètres comme pour le bâtiment Ricola.

Une structure secondaire faite de poteaux/dalles permet de porter la toiture et les différents étages.

Pour la première fois, cette façade en terre, avec isolation intégrée, est équipée d'un chauffage géothermique mural.

Les terres utilisées ici ne sont pas locales car l'argile jaune ne se trouve pas dans la région et a dû être amené depuis Stuttgart (70%) et Limbourg (30%). (Alnatura Campus | haas cook zemmrich STUDIO2050, s. d.) (« Lehmbau im Grossformat » , 2019)



(Haas cook zemmrich STUDIO2050, s. d.)

LÉGENDE

- 1- Fondations et soubassement en béton
- 2 - Plinthe extérieure cachant la remontée de l'étanchéité

Remontée de l'étanchéité et du soubassement contre la remontée d'eau

- 3- Mur porteur en blocs de pisé préfabriqués de 38 cm

Isolation intermédiaire en gravier de verre

Panneaux préfabriqués de pisé avec chauffage mural intégré de 14cm

- 4 - Mélange de trass et de ciment contre l'érosion

- 5 - Dalle de plancher en béton armé avec revêtement

- 6- Plaque d'ancrage de la salle dans une poutre horizontale en béton armé

- 7 - Poutre isolante armée

- 8 - Mur porteur en blocs de pisé préfabriqués de 38 cm d'épaisseur

Isolation intermédiaire en gravier de verre

Poutre en bois lamellé-collé

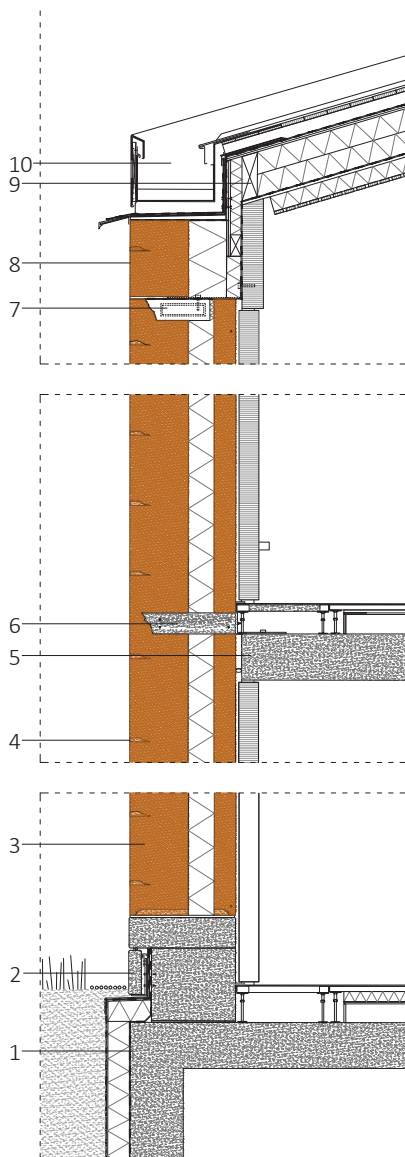
- 9 - Toiture en aluminium à joints debout

Gaines et ventilation

Toiture en bois avec isolation en laine minérale

Pare-vapeur seulement sous la toiture

- 10 - Gouttière d'évacuation des eaux de toiture



- ANNEXE 4 - JEU D'ÉPAISSEUR

NOM	<i>Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen</i>
LIEU	<i>Dehlingen, France</i>
TYPE	Équipement
ARCHITECTE	<i>Nuncs Architectes</i>
CLIENT	Communauté de communes d'Alsace Bossue
ANNÉE	2014

EXPLICATIONS Les murs en pisé sont porteurs et supportent les différents étages ainsi que la toiture. Le mur porteur varie de 60 centimètres à 40 centimètres afin de porter les étages. Un isolant de granules de lièges est ajouté entre la paroi extérieure en pisé et le mur porteur intérieur. La volonté est réellement de séparer le mur porteur de la façade extérieure afin d'avoir une meilleure stabilité et de laisser la façade extérieure subir à elle-seule les aléas de la nature. Une double peau de verre sur la face sud du bâtiment permet de préchauffer en hiver ou lors de la mi saison.

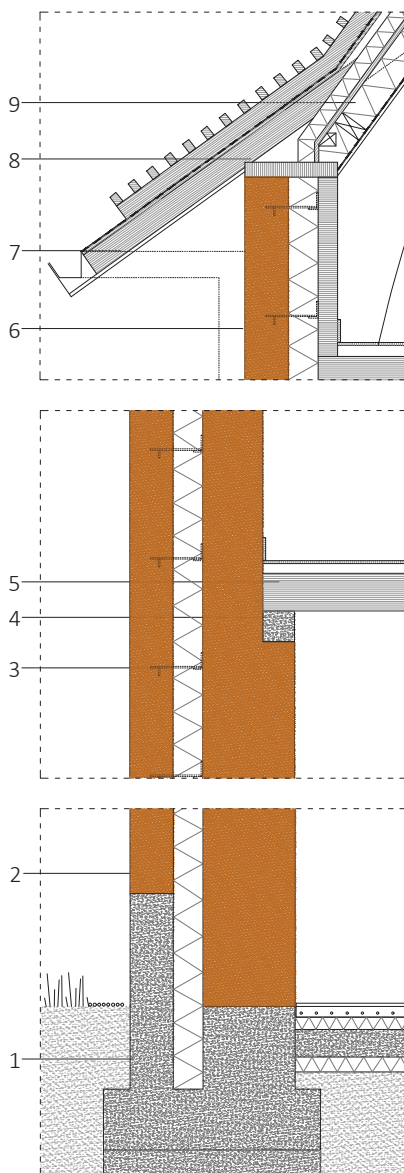
Les terres utilisées sont issues d'un site d'excavation situé à 5 km du centre d'interprétation du patrimoine archéologique. Le choix de la terre ici fait référence au patrimoine de la région et aux techniques constructives utilisées dans le pisé. (centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen - 67 – nunc architectes, 2022)



(Nunc architectes, 2022)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton
 - 2 - Façade non-portante en blocs préfabriqués
Isolant en liège
 - 3 - Équerre entre la paroi extérieure et la paroi intérieure
 - 4 - Support de plancher en béton avec chaînage horizontal
 - 5 - Dalle de plancher en bois
 - 6 - Façade non-portante fixée sur un mur à ossature bois à l'aide d'équerres
 - 7 - Habillage de la gouttière en zinc
 - 8 - Support de coyau
 - 9 - Toiture en surlattage de bois apparent avec profilés métalliques
- Étanchéité
Isolation
Pare-vapeur
Revêtement intérieur



Détail technique 1/50 *Centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen*, inspiré du dessin technique du bureau *NUNC* (nunc architectes, 2022)

- ANNEXE 5 - PRÉFABRIQUÉ ARCHÉ

NOM	<i>L'Orangerie</i>
LIEU	<i>Lyon, France</i>
TYPE	Bâtiment de bureaux
ARCHITECTE	<i>Clément Vergély Architectes et Diener&Diener</i>
CLIENT	Lyon Confluence
ANNÉE	2020

EXPLICATIONS Pour une hauteur de 11 mètres et une surface 1000m², la construction de ce bâtiment est une vraie performance. Le choix des arches est fait afin de profiter pleinement des capacités résistantes de la terre en compression.

La structure du projet a été une prouesse technique ; la façade en pisé est portante et soutient une structure bois sur deux étages ainsi que la toiture. Toutes les terres utilisées sont originaires de la région dans un rayon de 30km du site du projet. La composition du pisé ne contient aucun additif permettant la récupération et le recyclage de la matière terre.

286 blocs individuels de pisés préfabriqués ont été nécessaires à la construction de ce bâtiment. Le socle est fait à base de pierre naturelle et non de béton dans ce cas-ci. Tout le reste de la structure est en bois lamellé-collé, venant des Vosges et d'Autriche. L'épaisseur de la façade varie entre 85 et 50cm. La base étant plus épaisse que le haut afin de pouvoir porter les planchers en bois. (Ydéal, une nouvelle nature de ville, s. d.) (Stripping, 2022)



(Vergely architectes, 2021)

LÉGENDE

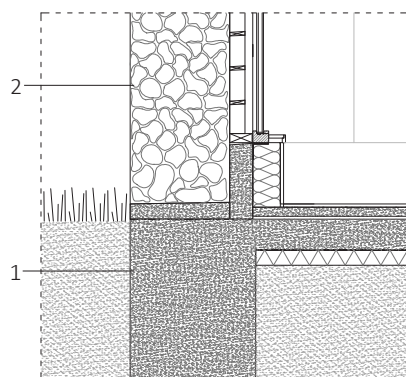
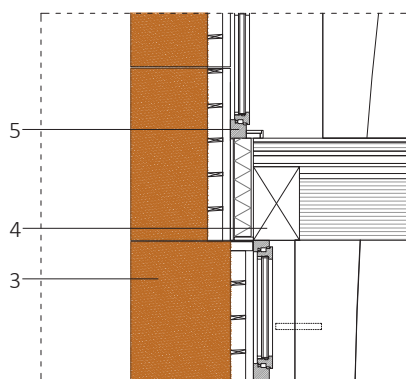
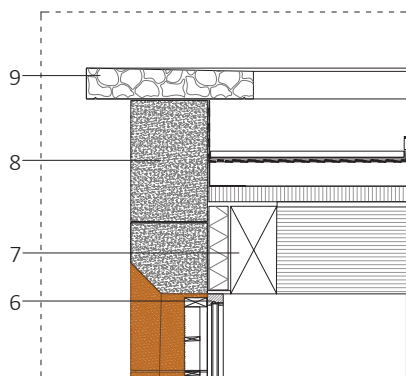
- 1 - Fondations en béton
- 2 - Soubassement en pierre naturelle
- 3 - Mur en pisé porteur de 85cm à la base et 50cm en haut

Isolation vers l'intérieur dans un mur à ossature bois

- 4 - Poutre horizontale en bois comme structure secondaire
- 5 - Châssis en bois entre les ossatures bois
- 6 - Châssis en bois entre les ossatures bois, passant derrière les voûtes de pisé
- 7 - Poutre en bois

Toiture plate isolée et étanche

- 8 - Acrotère en béton
- 9 - Couvertine en pierre naturelle



- ANNEXE 6 - CHASSIS INTÉGRÉ & FAÇADE PORTANTE

NOM	<i>Centre de visite de la garde des oiseaux</i>
LIEU	<i>Sempach, Suisse</i>
TYPE	Bâtiment animalier
ARCHITECTE	<i>MLZD Biel</i>
CLIENT	Station ornithologique suisse de Sempach
ANNÉE	2010-2015

EXPLICATIONS La façade en pisé est autoportante et est complétée d'une structure bois vers l'intérieur du bâti afin de porter la toiture et les trois étages. (: mlzd- Projects, s. d.)

La façade en pisé préfabriqué est autoportante. Une structure secondaire en béton armé permet de porter les étages ainsi que la toiture. Les différentes faces sont isolées de l'intérieur.

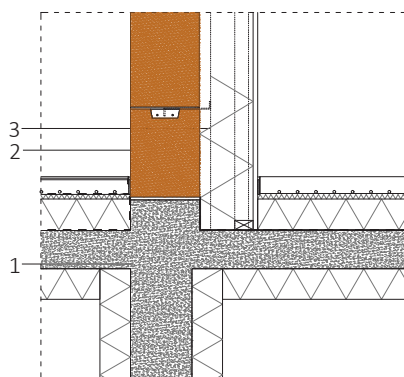
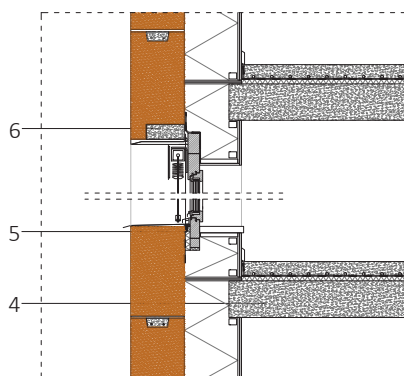
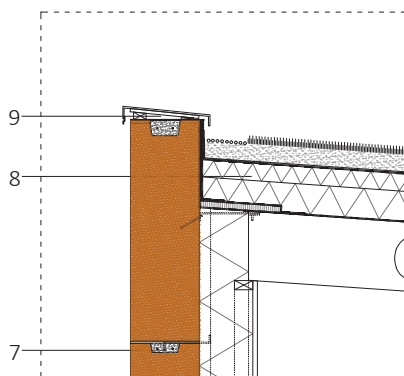
Les châssis des différentes ouvertures sont en acier corten et sont ancrées dans la façade en argile. (Van Es, 2022)



(: mlzd- Projects, s. d.)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton
Isolation de la structure
Pare-vapeur au niveau du sol
- 2 - Façade autoportante en blocs de pisé
préfabriqués 45 cm d'épaisseur
Isolation vers l'intérieur
- 3 - Colonnes en béton armé comme structure
portante
- 4 - Plancher en béton armé
- 5 - Chassis
- 6 - Linteau en béton armé
- 7 - Mélange de trass et de ciment contre l'érosion
- 8 - Toiture végétalisée et isolée sur base d'une
poutre en béton armé
- 9 - Couvertine en acier corten



Détail technique 1/50 - *Visitor center* - :mlzd, inspiré de la revue DETAIL (Detail, 2015)

- ANNEXE 7- MÉTHODES ANCÉSTRALES À L'ORDRE DU JOUR

NOM *Rammed Earth House*

LIEU *Arcidosso, Italy*

TYPE *Maison individuelle*

ARCHITECTE *Pietro Andres Melloni*

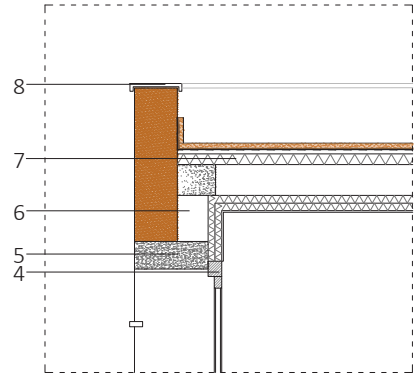
CLIENT *Privé*

ANNÉE *2012*

EXPLICATIONS Cette maison privé construite par un particulier reprend les techniques utilisées autrefois pour la construction en terre crue. Cette maison d'habitation n'est pas faite de blocs de pisé préfabriqué. Le pisé prend directement forme dans des moules lors de l'édification du bâtiment. Le pisé est ici également renforcé avec de l'acier dans les coins du bâtiment. Cette maisonnette de deux étages utilise des terres locales. (Rammed earth house, 2013)

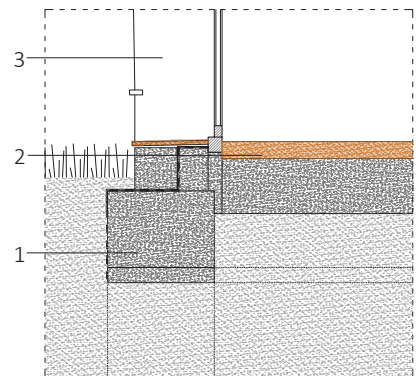


(Rammed earth house, 2013)



LÉGENDE

- 1 - Fondations en béton
- 2 - Carrelage en terre cuite sur chape en béton
- 3- Mur en pisé non-porteur de 30 cm
Colonnes en béton comme structure portante
Isolation de l'intérieur de la paroi
- 4 - Châssis
- 5 - Linteau en béton armé
- 6 - Poutre de plancher/toiture en béton reposant sur les colonnes en béton
- 7 - Dalle en béton avec revêtement en terre cuite
Toiture plate isolée et étanche
- 8 - Acrotère en pisé
Couvertine en terre cuite



Détail technique 1/50 *Rammed Earth House* - *Pierto Andres Malloni*, inspiré des dessins techniques partagés sur architizer (*Rammed earth house*, 2013)

- ANNEXE 8 - PROJET ÉTUDIANTS - ARTISANS

NOM	<i>Maison pour tous</i>
LIEU	<i>Four, France</i>
TYPE	Chantier participatif
ARCHITECTE	<i>Onsite Architecture (Marie et Keith Zawistowski)</i>
CLIENT	Commune de Four
ANNÉE	2018

EXPLICATIONS Dans cette petite commune française, les étudiants de master 1 de l'école d'architecture de Grenoble élabore et construit ce petit bâtiment public en collaboration avec des artisans spécialistes dans la matière. Dans cette partie du Rhône-Alpes de la France, l'utilisation du pisé est traditionnelle.

Le pisé est ici porteur de sa toiture possédant une légère pente et non stabilisé, ce qui signifie que l'argile est le seul liant dans la composition du pisé. Aucun autre aditif est utilisé. La terre utilisée est locale, extraite à 15 km du site du projet.

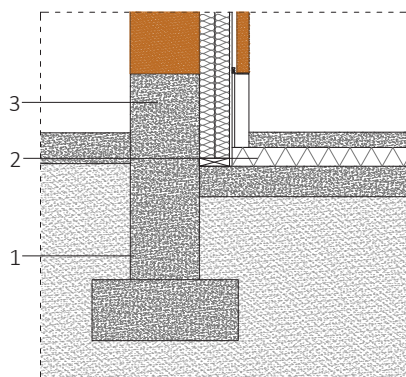
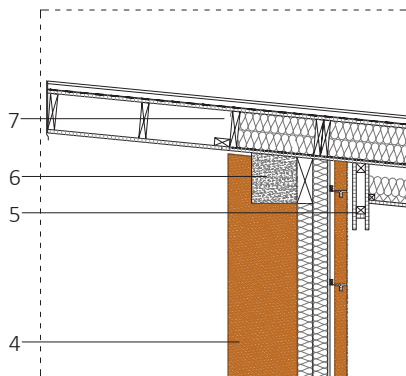
Le bâti est isolé de l'intérieur avec une laine de bois et la chose atypique ici est l'élaboration d'un parement intérieur en pisé préfabriqué. Cela a été conçu de façon expérimentale en s'inspirant de ce que *Martin Rauch* faisait dans ses propres projets. (timurersen.com, s. d.)



(timurersen.com, s. d.)

LÉGENDE

- 1 - Fondations en béton
- 2 - Dalle en béton armé
 - Isolation en verre cellulaire
 - Chappe de béton
- 3- Remontée du soubassement en béton avec couche d'étanchéité
- 4 - Mur en pisé porteur de la toiture fait sur place de 45cm d'épaisseur
 - Isolation en laine de bois
 - Parement intérieur en blocs de pisé préfabriqués de 8cm d'épaisseur
- 5 - Sous toiture en bois avec isolation
- 6 - Poutre en béton avec poutre en bois
- 7 - Toiture avec pente de 10% en zinc
 - Structure bois
 - Couche d'étanchéité
 - Isolation laine de bois
 - Pare-vapeur
 - Sous toiture



Détail technique 1/50 *Maison pour tous* - *Onsite Architecture*, inspiré des dessins techniques partagés sur *architizer* (Maison Pour Tous by *designbuildLAB*, 2020)

- ANNEXE 9 - LE PISÉ COMME IMAGE ÉCOLOGIQUE

NOM	<i>Cité Nollez</i>
LIEU	<i>Paris, France</i>
TYPE	Maison individuelle
ARCHITECTE	<i>Déchelette Architecture</i>
CLIENT	Privé
ANNÉE	2022

EXPLICATIONS Le pisé est ici plus utilisé de façon décorative, reflétant l'image écologique du projet.

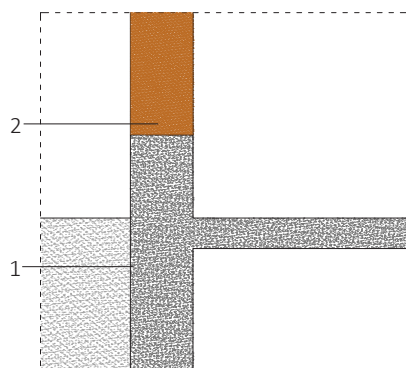
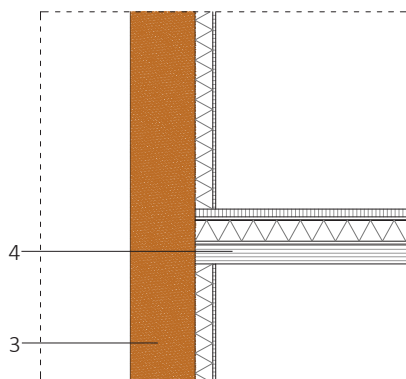
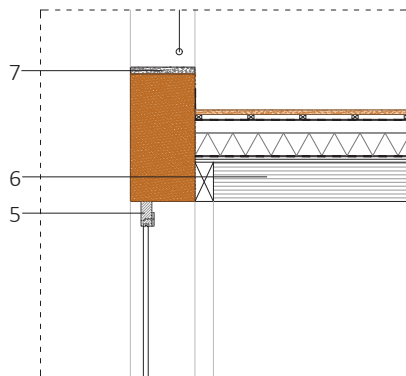
La structure principale est faite de soubassement en béton avec une structure bois des étages à la toiture. Le pisé en façade est autoportant et n'assure aucune autre fonctionnalité. (Admin, 2023)



(Admin, 2023)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton
- 2 - Pisé non porteur pour la façade avant du bâtiment
Pas d'isolation car le RDC est un commerce
- 3 - Pisé non porteur pour la façade avant du bâtiment
Isolation car les étages sont des habitations
Structure bois
- 4 - Plancher portant sur une structure bois dans l'autre sens
Isolation
Revêtement plancher en bois
- 5 - Châssis bois
Linteau métallique
- 6 - Poutre en bois pour la toiture terrasse
Isolation et étanchéisation de la toiture
Revêtement de la toiture terrasse à base de dalles de pierres
- 7 - Acrotère en pisé avec couvertine en béton



- ANNEXE 10 - BLOC TERREUX

NOM	<i>Cemetery & Chapel</i>
LIEU	<i>Batschuns, Autriche</i>
TYPE	Chapelle & extension cimetière
ARCHITECTE	<i>Marte.Marte Architects</i>
CLIENT	Municipalité d'Interwasser
ANNÉE	2001

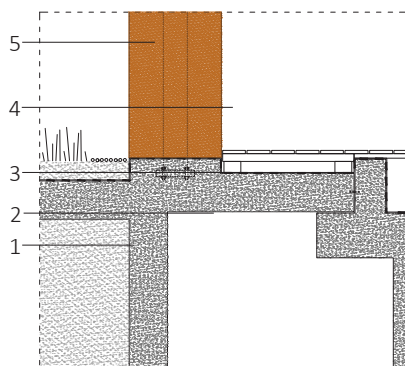
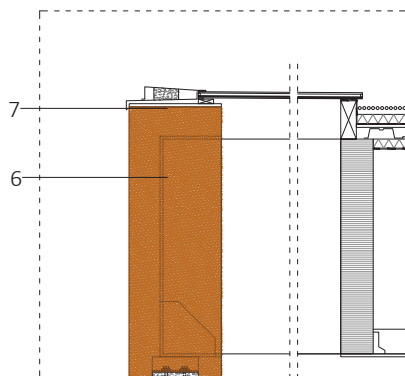
EXPLICATIONS Cette extension du cimetière est une chapelle pensée comme un bloc en pisé sans ouverture sauf une fente sur le côté. Le pisé est ici porteur et des poutres de béton sont insérées dedans afin de porter la toiture. (Friedhof Batschuns – Marte.Marte Architekten, s. d.)



(Friedhof Batschuns – Marte.Marte Architekten, s. d.)

LÉGENDE

- 1 - Fondations en béton coloré à l'argile
- 2 - Poutre en béton armé porteur du plancher
- 3 - Sol de terre crue battue, compactée et stabilisée
- 4 - Armature dans le mur en pisé
- 5 - Mur en pisé porteur de 45cm d'épaisseur
- 6 - Poutre de béton comme renforcement du pisé permet de porter la toiture et les châssis en toiture
- 7 - Châssis en toiture avec couverture en aluminium sur le mur en pisé



Détail technique 1/50 *Cimetière et Chapelle* - *Marte.Marte Architects*, inspiré de la revue DETAIL (Detail , 2003)

- ANNEXE 11 - TERRE ET EAU

NOM	<i>Piscina Municipal</i>
LIEU	<i>Torro, Espagne</i>
TYPE	Piscine municipale
ARCHITECTE	<i>Vier Arquitectos slp</i>
CLIENT	Mairie de Torro
ANNÉE	2010

EXPLICATIONS La terre et l'eau de font pas bon mélanges. Il y avait un vrai challenge à relever : construire une piscine entourée de terre ; terre qui n'est en aucun cas hydrophobe.

Le pisé est ici porteur de la toiture du bâti sur une large surface de par le programme du projet. Un mur porteur de poutre bois à cette échelle n'a pas encore été vu et le bureau reçoit un prix pour cette performance. Une telle portée oblige naturellement à avoir un renforcement en acier à l'intérieur des murs en pisé.

Quant à la jonction eau et terre, elle est ici envisagée par une juste balance entre l'utilisation du béton pour les fondations et l'utilisation du pisé pour les murs extérieurs.

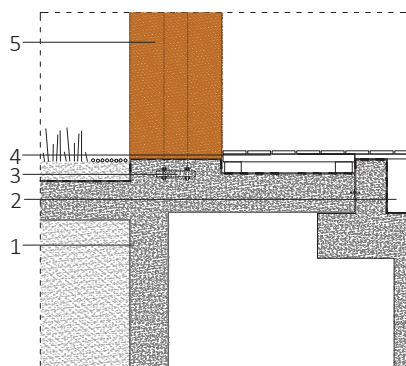
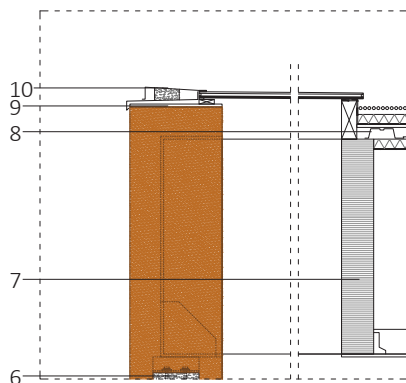
L'utilisation de la terre est ici également un choix thermique plus adapté à un programme de piscine. (Ficha – Piscina en Toro francés | VIER, s. d.)



(Ficha – Piscina en Toro francés | VIER, s. d.)

LÉGENDE

- 1 - Fondations en béton pour le bâti
- 2 - Fondations en béton pour la piscine
- 3- Armature entre le mur en pisé et les fondations en béton
- 4 - Plancher en bois traité
- 5 - Mur en pisé porteur de 60cm d'épaisseur, mélange de terres et d'agréats hydrophobes
- 6 - Poutre en béton armé portant la toiture
- 7 - Poutre en bois pour la toiture
- 8 - Gravier sur la toiture
Isolant avec dénivelé
Couche d'étanchéité
Isolant
Pare-vapeur
- 9 - Couvertine en acier corten
- 10- Châssis en toiture



Détail technique 1/50 *Piscina Municipal* - *Vier Arquitectos slp*, inspiré de la revue DETAIL (Detail , 2011)

- ANNEXE 12 - EXPÉRIMENTATION CONTEMPORAINE

NOM	<i>Casa da Tapia</i>
LIEU	<i>Ayerbe, Espagne</i>
TYPE	Maison familiale
ARCHITECTE	<i>Edra Arquitectura km 0</i>
CLIENT	Privé
ANNÉE	2014

EXPLICATIONS Après plus de 10 ans de recherches sur l'architecture traditionnelle, ce bureau construit la maison Tapia en réadaptant les techniques ancestrales de la construction en pisé aux enjeux environnementaux actuels.

Pour ce projet, plusieurs matériaux ont été utilisés : la pierre, la terre et la paille à 80% et de la chaux, du bois, des tuiles et de la laine de mouton à 20%. Tous les matériaux sont locaux et sont extraits, cherchés ou fabriqués à proximité du site. Le but est tout de même de se retrouver avec un matériau réutilisable dans sa totalité après démantèlement du bâti.

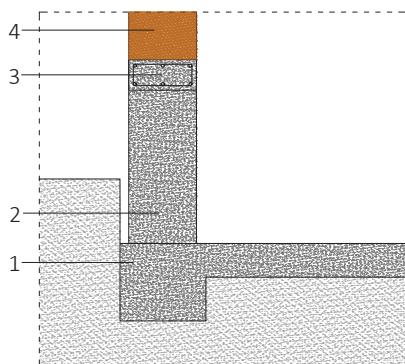
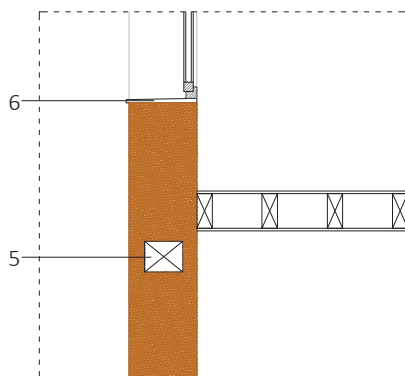
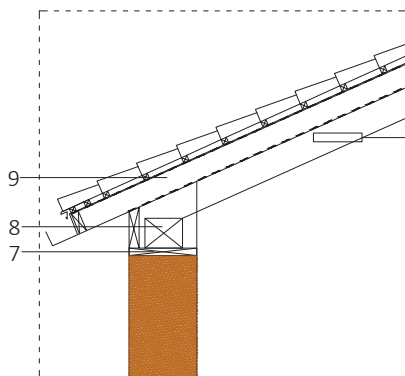
La structure secondaire est composée de bois et de béton pour les soubassements adaptés au dénivelé et aux fondations du bâtiment. (Casa de Tapia, 2021)



(Casa de Tapia, 2021)

LÉGENDE

- 1 - Fondations en béton
- 2 - Haut soubassement en béton
- 3 - Poutre horizontale en béton armé avec chainage horizontal
- 4 - Mur en pisé porteur, mélange de chaux et de terres
Pas d'isolation
- 5 - Poutre horizontale en bois porteuse de l'étage
- 6 - Châssis bois
- 7 - Support de coyau
- 8 - Poutre en bois portant la toiture bois
- 9 - Toiture à deux pents avec tôles en terre cuite
Toiture non isolée



- ANNEXE 13 - RESSOURCE LOCALE

NOM	<i>Maison de Chasse</i>
LIEU	Belgique
TYPE	Maison de chasse
ARCHITECTE	<i>BC architects & studies</i>
CLIENT	Privé
ANNÉE	2012

EXPLICATIONS Cette maison de chasse est faite durant le premier workshop organisé par le bureau *BC architects & studies*. La technique du pisé est utilisée pour élaborer cette maison de chasse.

Les murs sont porteurs de la structure bois en toiture et reposent sur un soubassement en béton.

Les terres utilisées sont extraites sur le site même avant d'être stockées et mélangées dans une tente montée à cet effet.

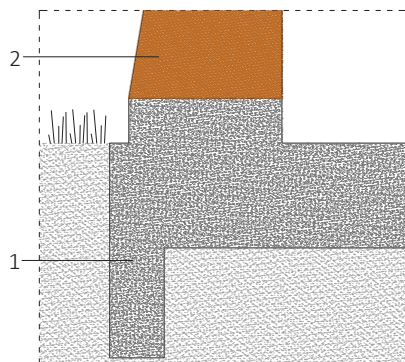
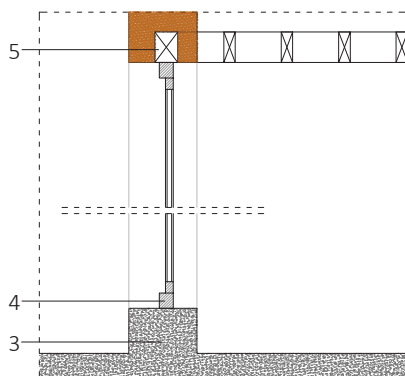
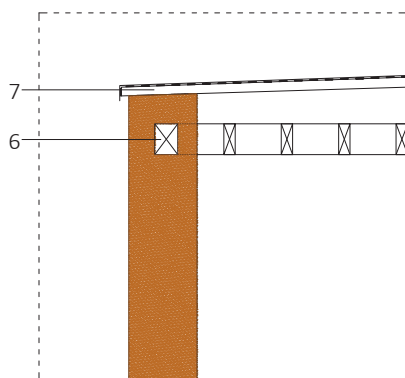
La simplicité et l'efficacité de la terre pour ce type de petite construction est remarquable. (Maison de chasse | bc-as, s. d.)



(Maison de chasse | bc-as, s. d.)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton
- 2 - Mur en pisé porteur
Mur non isolé
- 3- Soubassement en béton pour châssis
- 4 - Châssis en bois
- 5 - Poutre horizontale en bois porteuse de la toiture, sert de linteau pour la fenêtre
- 6 - Poutre horizontale en bois porteuse de la toiture
- 7 - Toiture en pente légère
Étanchéité de la toiture



Détail technique 1/50 *Maison de Chasse* - BC Architects & studios, inspiré des coupes détaillés des architectes (bc-as, s. d.)

- ANNEXE 14 - LA TERRE SE FOND DANS LE PAYSAGE

NOM	<i>House in Cunha</i>
LIEU	<i>Cunha, Brésil</i>
TYPE	Maison individuelle
ARCHITECTE	<i>Arquipélago Arquitetos</i>
CLIENT	Privé
ANNÉE	2019

EXPLICATIONS Cette maison située au Brésil est construite à base de murs en pisé sur l'extérieur du bâti et de briques de terre cuite pour l'intérieur. À demi enfoncée dans le sol, les architectes ont choisi de façonner le mur de la maison en pisé sur un mur de béton qui sert de soubassement au mur de pisé.

La terre a ici été choisie afin de laisser la maison se fondre dans le décor terreux de la région, au point où celle-ci disparaît dans le paysage.

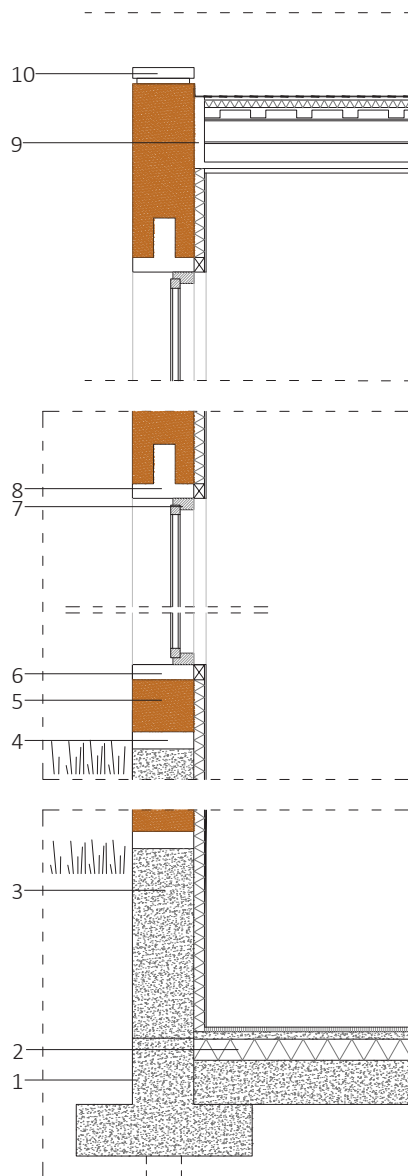
La toiture faite de bois porte sur le mur en pisé extérieur et sur les murs en briques intérieurs. (Arquipélago, FEDERICO CAIROLI · HOUSE IN CUNHA, s. d.) (Caballero, 2022)



(Caballero, 2022)

LÉGENDE

- 1 - Fondations en béton armé
- 2 - Dalle de béton
Isolation et étanchéité
Chape de béton
- 3- Soubassement en béton armé
Isolation par l'intérieur
Revêtement
- 4 - Support en béton armé coloré sur la continuité du mur
- 5 - Mur en pisé
Isolation par l'intérieur
Revêtement
- 6 - Seuil de fenêtre en béton armé coloré sur la continuité du mur
- 7 - Châssis
- 8 - Linteau en T en béton armé coloré
- 9 - Toiture en bois avec couche d'étanchéité et isolation
- 10- Couvertine en béton armé coloré



Détail technique 1/50 *House in Cuhna - Arquipélago Arquitectos*, inspiré du site Archdaily (Caballero, 2022)

- ANNEXE 15 - TERRE COMME SYMBOLIQUE AUTOCHTONE

NOM *Nk'Mip Desert Cultural Centre*

LIEU *OSOYOOS, CANADA*

TYPE Équipements

ARCHITECTE *DIALOG*

CLIENT Ville d'Osoyoos

ANNÉE 2006

EXPLICATIONS L'essence même du projet ici est le caractère traditionnel de l'utilisation de la terre. Les architectes offrent ici un renouveau de la matière terre en proposant ce bâtiment symboliquement comme hommage à la culture aborigène de la région. La terre étant l'héritage qui nous reste des communautés passées.

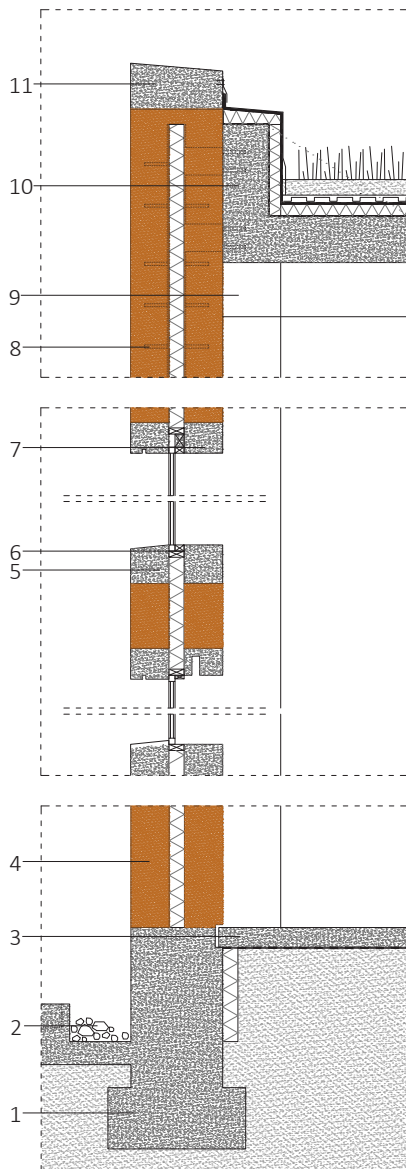
Ils proposent ici un retour de l'utilisation de la terre tout en le faisant à la manière de construire aujourd'hui. (Nk'Mip Desert Cultural Centre | DIALOG, s. d.) (Valenzuela, 2021)



(Valenzuela, 2021)

LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en béton armé
- 2 - Passage d'eau en pente légère
- 3 - Dalle en béton armé
Pare-vapeur
Isolation
- 4 - Mur en pisé avec renforcements 25cm
Isolation
Mur en pisé avec renforcements 25cm
- 5 - Seuil de la fenêtre, mélange de terre et de ciment
- 6 - Châssis non apparents
- 7 - Linteau avec casse-gouttes, mélange de terre et de ciment
- 8 - Cadrage d'armatures encastré entre les deux parois de pisé
- 9 - Colonne et poutre en béton armé, structure principale
- 10 - Toiture isolée en béton armé avec acrotère en béton armé
Végétation extensive
- 11 - Couvertine en béton comme protection pour le mur en pisé
Jonction avec la couvertine de l'acrotère en béton



- ANNEXE 16 - CHARPENTIER - PISÉ

NOM	<i>Zenkonyu × Tamping Earth</i>
LIEU	Japon
TYPE	Atelier individuel
ARCHITECTE	<i>Tadashi Saito + Atelier NAVE</i>
CLIENT	Triennale de Setouchi 2013
ANNÉE	2013

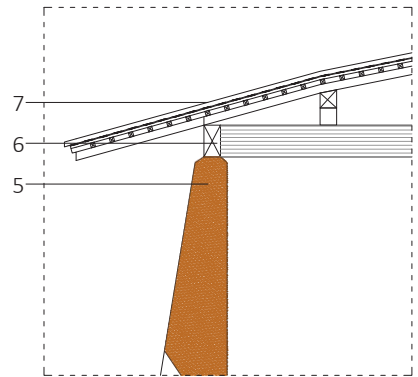
EXPLICATIONS Pour la *Triennale de Setouchi* en 2013, ces architectes proposent un retour aux métiers de base pratiqués dans la région tout en revalorisant les matériaux locaux. N'ayant que très peu de ressources, les architectes se retrouvent rapidement à travailler le bois et la terre, seules ressources locales à moindre coûts.

L'utilisation d'une dérivée du pisé appelée «HANCHIKU» est originaire de la région. Il s'agit ici d'un mélange de terres et de chaux. La chaux est ajoutée au mélange à des fins de résistances du bâti.

Le chantier pour la construction de ce projet se fait avec plus de 300 personnes venant s'associer aux architectes et aux charpentiers. La terre offre ici la possibilité d'un chantier participatif. (Tadashi Saito + Atelier NAVE, 2014) (Sánchez, 2021)

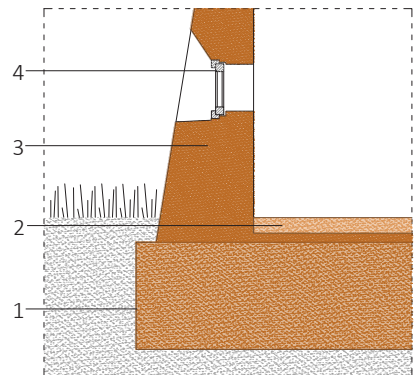


(Sánchez, 2021)



LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en terre stabilisée
- 2 - Sol en terre crue
- 3 - Mur porteur en pisé
- 4 - Châssis bois
- 5 - Mur en pisé porteur aminci sur le dessus
- 6 - Poutre de bois pour la structure de la toiture
- 7 - Tôle métallique comme finition de toiture
Pas d'isolation de la toiture
Couche d'étanchéité



Détail technique 1/50 *Zenkonyu* × *Tamping Earth* - *Tadashi Saito* + *Atelier NAVE*, inspiré du site Archdaily (Sánchez, 2021)

- ANNEXE 17 - TERRE LOCALE ET AMBIANCE

NOM *Women's House in Africa*

LIEU *Baghère, Senegal*

TYPE *Maison, équipement*

ARCHITECTE *Juan Pablo Lopez Isabella*

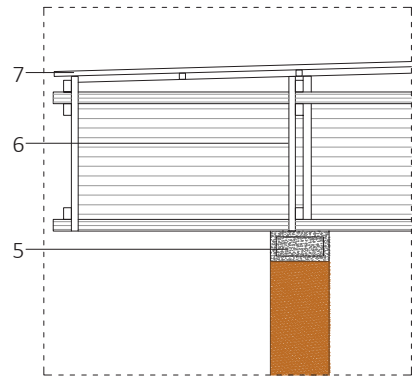
CLIENT *Kaira Loro Competition*

ANNÉE *2021*

EXPLICATIONS La terre est ici utilisée par tradition et disponibilité des ressources. Le choix de la terre s'est fait naturellement de par l'envie de créer cet espace chaleureux et pleins de sensibilité architecturale afin d'offrir un confort aux femmes qui se rejoignent dans ce lieu. (The Best New Architects, 2021)

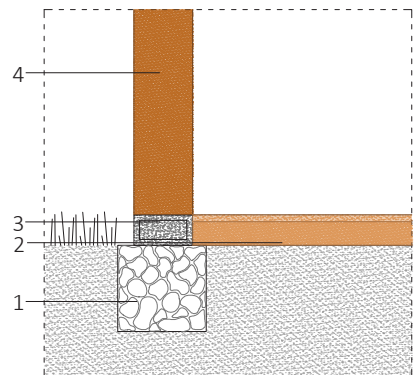


(The Best New Architects, 2021)



LÉGENDE

- 1 - Fondations et soubassement en pierre
- 2 - Pavés de terre cuite sur dalle de terre avec pare-vapeur
- 3 - Soubassement en béton armé et coloré
- 4 - Mur en pisé
- 5 - Partie supérieure en béton armé et coloré servant de support de coyau pour la toiture
- 6 - Structure de la toiture en bois et en bambou
- 7 - Tôle en zinc comme finition de toiture



Détail technique 1/50 *Women's House* - Juan Pablo Lopez Isabella, inspiré du site The best new Architects (The Best New Architects, 2021)

- ANNEXE 18 -

NOM Crèche 24 berceaux – Palais de l’Alma

LIEU Paris, France

TYPE Crèche, équipements

ARCHITECTE Atelier Régis Roudil architectes

CLIENT Présidence de la République

ANNÉE 2022

EXPLICATIONS Cette crèche parisienne propose ici une combinaison de bois et de pisé. Le pisé sert de finition et de couverture pour les extrémités du bâtiment. En l’occurrence dans ce cas-ci, le pisé est utilisé à des fins esthétiques et non plus pour ses qualités structurelles ou autre.

Le pisé aurait tout simplement pu être remplacé par le bois, élément principal dans ce projet.



(Atelier Régis Roudil, 2022)

- ANNEXE 19 -

NOM	Casa da Vinha
LIEU	Montijo, Portugal
TYPE	Équipements
ARCHITECTE	Blaanc
CLIENT	Privé
ANNÉE	2015

EXPLICATIONS Dans ce cas-ci, le bureau *BLAANC* a décidé de faire recours à la terre pour ses qualités d'ambiance et de confort. Il exploite la matière terre dans les espaces dits collectifs alors que le reste du bâtiment reste sobre et blanc.

La terre offre un côté chaleureux et esthétique aux espaces de vie communes. (Blaanc, 2015)



(Blaanc, 2015)

- ANNEXE 20 -

NOM	SanBaoPeng Art Museum
LIEU	JINGDEZHENG, CHINA
TYPE	Musée
ARCHITECTE	DL Atelier
CLIENT	Sanbaoteng Art Settlement
ANNÉE	2017

EXPLICATIONS Le musée de SanBaoPeng est un musée qui regroupent plusieurs ateliers et artistes autour de la même passion : la potterie, la terre cuite. De ce fait, les architectes souhaitaient retransmettre cette facette des artistes au travers de la matérialité du projet.

Les murs en pisé font plus de 60cm d'épaisseur et sont porteurs de la structure du musée. Afin de pouvoir supporter une telle structure, le pisé est mélangé à du ciment et est renforcé avec de l'acier. (DL Atelier, 2021)

Le pisé retranscrit ici une image très forte et le choix de la matérialité comme esthétique du bâti marque son importance.



(Yuekang, 2021)

