



**HAL**  
open science

# Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France

Sophie Bioul

► **To cite this version:**

Sophie Bioul. Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France. Sciences de l'Homme et Société. 2020. dumas-03093794

**HAL Id: dumas-03093794**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03093794>**

Submitted on 4 Jan 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE

Mémoire de

Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement - Mention Patrimoine  
Architecture de Terre, Cultures constructives et développement durable

DSA-TERRE 2018 – 2020

# PRINCIPES TECHNIQUES GÉNÉRAUX DE CONCEPTION ARCHITECTURALE EN TERRE CRUE EN ÎLE-DE-FRANCE

Sophie BIOUL

Architecte habilitée à la maîtrise d'oeuvre en Belgique

Novembre 2020



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE

Mémoire de

Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement - Mention Patrimoine  
Architecture de Terre, Cultures constructives et développement durable

DSA-Terre 2018 – 2020

# PRINCIPES TECHNIQUES GÉNÉRAUX DE CONCEPTION ARCHITECTURALE EN TERRE CRUE EN ÎLE-DE-FRANCE

Sophie BIOUL

Architecte habilitée à la maîtrise d'oeuvre en Belgique

Novembre 2020

Soutenance : 01.12.2020

## Composition du jury

Directeur d'études

MISSE Arnaud, architecte DPLG, dipl.CEAA-Terre, maître de conférences  
TPCAU, chercheur au CRAterre-AE&CC-ENSAG-UGA

Enseignants à l'ENSAG et équipe pédagogique du DSA-Terre

MAMA AWAL Halimatou, architecte DPLG, docteure, maître de conférences  
HCA, chercheuse au CRAterre-AE&CC-ENSAG-UGA

POINTET Martin, architecte DPLG, maître de conférences STA, chercheur  
au CRAterre-AE&CC-ENSAG-UGA

GARNIER Philippe, architecte DPLG, CEAA-Terre, VT, chercheur associé  
au CRAterre-AE&CC-ENSAG-UGA

Ministère de la Culture et de la Communication

Direction générale des patrimoines

V2



Ce travail n'aurait pas été possible sans l'équipe d'amàco qui m'accueille depuis maintenant près d'un an et demi. Ma reconnaissance revient en particulier à Laetitia Fontaine et Romain Anger pour m'avoir fait confiance, lancée et accompagnée sur des projets ambitieux.

Je remercie tout particulièrement Arnaud Misse pour nos échanges et ses retours sur mon travail ainsi qu'Hugo Houben, Martin Pointet et Sébastien Morisset pour leurs apports bibliographiques et iconographiques. Leurs enseignements à l'ENSAG, ainsi que ceux de Michel Procès et Jacques Claessens à LOCI UCL ont particulièrement nourri ce travail. Je les remercie d'avoir généreusement transmis leurs documents, connaissances et expériences. Merci également à Aurélie Vissac, Patrick Ribet et Lionel Ronsoux d'amàco, ainsi qu'à Thierry Joffroy d'AE&CC et Silvia Devescovi de la mairie de Sevran pour leur relecture attentive et leurs commentaires constructifs. Merci également à tou-te-s les architectes et photographes qui ont gracieusement autorisé l'utilisation des photographies qui illustrent ce mémoire.

En cette fin de formation, mes pensées vont également vers Odile Vandermeren et Mariam Sy qui m'ont transmis les premières leur passion pour la terre, ainsi que vers Nuria Sánchez, Olivier Moles et Carole Fournier qui, depuis Ouagadougou, m'ont mise sur la voie du DSA-terre.

Dernier mais pas des moindres, je remercie enfin Maxime pour son soutien inconditionnel qui m'a permis de mener jusqu'au bout cette spécialisation.

## Sommaire

<b>Préambule</b>	<b>8</b>
<b>Introduction</b>	<b>11</b>
Cycle Terre	12
Sensibilisation et formation	14
<b>Caractéristiques techniques des matériaux</b>	<b>17</b>
Énergie grise et bilan carbone	18
Réversibilité et durabilité à l'eau	20
Résistance mécanique	21
Qualités hygrothermiques	24
Propriétés acoustiques	26
Réaction au feu	27
Qualités sensibles	27
<b>Dispositions constructives</b>	<b>31</b>
<b>Grands principes de conception</b>	<b>32</b>
Concevoir à partir de la ressource et du milieu	32
Mesurer l'importance de l'eau	33
Proposer la simplicité au-delà de la complexité	34
Tirer parti des propriétés hygrothermiques	35
<b>Principaux facteurs de dégradation</b>	<b>40</b>
Sensibilité à l'eau	40
Résistance mécanique	44
Stabilité	46
Variation dimensionnelle	47
Résistance à l'arrachement	47
Durabilité aux chocs et frottements	48

Dispositions constructives par élément	49
Parois verticales · généralités	49
Façades	64
Murs porteurs	80
Cloisons et remplissages	92
Franchissements et finitions de sols	96
<b>Stratégies d'intégration à l'échelle du bâti</b>	<b>101</b>
Options d'intégration et leurs contraintes techniques	102
Données associées aux matériaux et à la filière terre crue	106
Enjeux stratégiques du projet	108
Analyse critique des options d'intégration	110
Avantages et inconvénients selon l'élément d'intégration	110
Avantages et inconvénients selon l'usage vertical	112
Avantages et inconvénients selon l'usage horizontal	114
Tableaux de synthèse	116
<b>Postface · constats, améliorations, perspectives</b>	<b>121</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>125</b>
<b>Table des illustrations</b>	<b>128</b>

# Préambule

## Genèse

Ce travail a été réalisé dans le cadre de mon stage de DSA Architecture de Terre, Cultures Constructives et Développement Durable auprès d'amàco, partenaire du projet Cycle Terre. Dans le cadre de ce dernier, la nécessité d'apporter des réponses claires et aussi complètes que possible aux questions techniques et stratégiques des concepteurs et promoteurs contemporains d'Île-de-France a mené à la volonté d'enrichir les formations de nouveaux contenus. En réponse aux besoins exprimés par Romain Anger, j'ai rapidement proposé de constituer 3 ensembles de contenus relatifs aux matériaux en terre crue : *Performances et atouts*, *Spécificités de mise en œuvre* (pathologies et solutions constructives) et *Stratégies d'intégration*.

Le développement des deux premiers sujets a débuté par un vaste travail de collecte de références techniques et architecturales avec la précieuse aide d'Hugo Houben, Arnaud Misse et Sébastien Moriset du laboratoire AE&CC/CRAterre et l'apport des contenus de formation préexistants du DSA-terre et d'amàco. Le développement parallèle du MOOC *Construire en Terre Crue Aujourd'hui\** proposé par amàco avec Léo Boulicot et Basile Cloquet a par ailleurs permis un enrichissement mutuel des contenus. De ces références, des illustrations (photographies, schémas, graphiques, ...) ont été sélectionnées et mises en page pour former un recueil de plus de 1000 pages, avec la volonté de mettre autant que possible en avant les applications contemporaines, urbaines et françaises des matériaux en terre crue. La première partie, *Performances et atouts des matériaux en terre crue* est ordonnée selon les propriétés des matériaux. Elle met en lumière l'opportunité qu'ils offrent de répondre aux enjeux sociétaux actuels. La seconde, *Spécificités de mise en œuvre des matériaux en terre crue* (pathologies et solutions constructives) est présentée comme un tableau à double entrée : d'une part les facteurs de dégradation du matériau et des éléments en regard de leurs spécificités, et d'autre part les éléments constructifs.

Les demandes des concepteurs et promoteurs ne se limitent cependant pas aux caractéristiques et détails techniques. Ceux-ci souhaitent également être informés de la meilleure stratégie d'intégration de la terre dans le contexte francilien. La réponse étant multiple et dépendante du contexte du projet, j'ai proposé d'organiser le troisième sujet d'étude, *Stratégies d'intégration*, sous la forme d'un tableau à multiples entrées permettant de répertorier les stratégies envisageables. La réflexion structurée a alors pu être nourrie des échanges avec architectes, promoteurs et entreprises pour lister de manière non exhaustive les avantages et inconvénients des différentes stratégies.

Ces trois contenus sont aujourd'hui déclinés en formations à

---

\* amàco, Cloquet, Boulicot, 2020

destination des concepteurs. Les deux premiers sont exposés en cours magistraux dont les apports théoriques nourrissent un atelier-débat encadré sur les stratégies d'intégration des matériaux en terre crue en Île-de-France. Le recueil d'illustrations constitué permet par ailleurs de fournir rapidement des réponses claires aux demandes de concepteurs dans le cadre de l'appui technique fourni par Cycle Terre.

Ce recueil n'étant constitué que d'illustrations organisées, il lui fallait un pendant rhétorique pour être intelligible. Ce mémoire réorganise et explicite synthétiquement ces contenus collectés et développés de manière à les rendre appréhendables. Certaines parties sont destinées à être reprises dans le guide Cycle Terre à destination des concepteurs. Celui-ci sera composé des participations d'amàco, de l'agence d'architecture Jolly & Loiret, d'AE&CC et du CRAterre.

### Gains personnels et motivation

Ce travail est l'aboutissement de recherches qui m'ont permis de conforter et d'approfondir l'enseignement technique dispensé durant la formation à l'ENSAG. J'ai ainsi pu acquérir une meilleure compréhension de la matière et des matériaux à base de terre crue et une plus grande maîtrise des détails de leur mise en œuvre, en particulier dans le contexte français.

### Limites dictées par le contexte

Le recueil d'illustrations qui a servi de base à ce travail a été constitué dans le cadre du projet Cycle Terre, et une partie du contenu de ce mémoire sera reprise au guide Cycle Terre à destination des concepteurs. Il s'agit là d'un travail de communication au service du projet européen, ayant une visée opérationnelle définie, et qui peut donc à certains égards et dans certaines mesures manquer d'objectivité.

Notons en particulier que l'un des objectifs du guide est de mettre les matériaux Cycle Terre à l'honneur. Les textes des chapitres généraux, même si applicables à la construction en terre crue dans son ensemble, mentionnent en priorité les produits Cycle Terre et précisent les avantages des matériaux manufacturés.

L'ouvrage est par ailleurs mis au service du concepteur en l'informant au mieux des règles de l'art dans un but pratique. Les éventuels débats quant aux mises en œuvre possibles ne sont pas mis en avant. S'ils sont énoncés, c'est pour en informer le concepteur sans mettre en opposition les personnes qui défendent des idées différentes. L'objectif de l'ouvrage n'est pas de soulever des polémiques.

Pour terminer, précisons que les temporalités décalées ont rendu impossible l'intégration des contenus des ATEx Cycle Terre dans cette mouture du document. Si le mémoire doit s'en contenter, le guide fera l'objet de rééditions successives permettant d'intégrer les évolutions du projet. Le guide fera également l'objet de vérifications plus avancées des contenus techniques.



CYCLE  
TERRE

emploie

## Introduction

Dans le cadre du projet Cycle Terre, mené par treize partenaires associés, la formation des concepteurs a rapidement été identifiée comme essentielle. Les actions de formation se déclinent en séances d'information, accompagnement, formations journalières et édition d'un guide de conception.

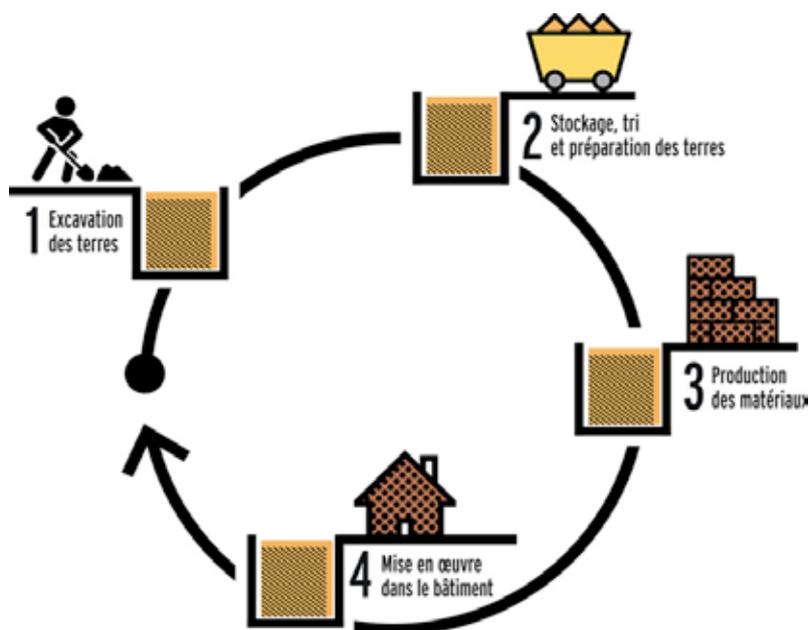
Le présent document présente les principes généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de France. Son contenu sera partiellement repris dans le guide Cycle Terre à destination des concepteurs.

Cette introduction explicite le contexte dans lequel ces contenus ont été créés en précisant l'objet du projet Cycle Terre puis en détaillant les enjeux associés à ces actions de formations.

← 1

Les bâtiments de la fabrique Cycle Terre dont la première pierre a été posée en novembre 2020 ont été conçus par les architectes Paul-Emmanuel Loiret et Serge Joly.

Illustration · P.-E. Loiret & S. Joly, architectes



2 ↗

## Cycle Terre

Cycle Terre est un projet d'économie circulaire qui vise le développement de la filière de construction en terre crue en Île-de-France.

Illustration · Cycle Terre

Cycle Terre est un projet ayant pour objectif opérationnel la création d'une fabrique de matériaux en terre crue à Sevran. La matière première provenant des chantiers du Grand Paris et les matériaux étant destinés aux chantiers d'Île-de-France, le projet entend développer une économie circulaire vertueuse.

### Les enjeux

Les nouvelles données du changement climatique imposent au secteur du bâtiment de changer de paradigme. Selon le ministère de la transition écologique, il est en effet responsable de plus de 40% de l'énergie totale consommée en France et quasiment du quart des émissions de gaz à effet de serre\*. Le secteur de la construction est par ailleurs confronté à la problématique de gestion des terres de déblais qui représentent environ 50% des déchets gérés par les établissements du BTP selon l'*Enquête sur les déchets et déblais produits par l'activité BTP en 2014*\*\* . Leur valorisation comme matériau de construction permet de répondre simultanément à ces deux enjeux. La terre excavée, considérée aujourd'hui comme un rebut encombrant, devient alors une ressource locale considérable permettant de réduire l'énergie utilisée pour la production, l'usage, et la fin de vie de notre habitat.

*L'ATEx est une procédure rapide d'évaluation technique formulée par un groupe d'experts sur tout produit, procédé ou équipement innovant. Cette évaluation est souvent utilisée (...) en préalable à un Avis Technique, car elle permet des premiers retours d'expérience sur la mise en œuvre des procédés (...).*

Source · *Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX)* (CSTB, [s.d.] )

\* Ministère de la transition écologique, 2017

\*\* Commissariat général au développement durable, Moreau, Bottin, 2017

Le projet entend répondre à ces enjeux environnementaux en intégrant les contraintes du secteur. Par rapport aux techniques traditionnelles de construction en terre crue nécessitant généralement beaucoup de main d'œuvre, la mécanisation partielle des lignes de production induit une diminution du coût. Les matériaux secs maçonnés ou assemblés sur chantier permettent par ailleurs une réduction des délais d'exécution.

## Le projet

Le projet Cycle Terre, subventionné par le fonds FEDER de l'Union Européenne au travers de l'initiative « Actions Innovatrices Urbaines » (AIU), rassemble treize partenaires : la ville de Sevran, Grand Paris Aménagement, Quartus, Joly&Loiret, AE&CC, CRAterre, amàco, la Société du Grand Paris, Antea, Iffstar, Sciences-Po, Compétences Emploi et ECT.

Il vise le développement de la filière de construction en terre crue en Île-de-France. Outre la conception et construction de la fabrique et des lignes de production, le projet comprend une part importante de recherche sur les matériaux et systèmes constructifs : identification, analyse et préparation des matières premières, pré-production de matériaux en atelier et validation en laboratoire, optimisation des matériaux et systèmes constructifs en vue d'en augmenter les performances et d'en diminuer le coût de mise en œuvre.

Le travail concerne également la certification des matériaux et systèmes constructifs. Trois *Appréciations Techniques d'Expérimentation* (ATEx) de type a sont prévues, encadrées par diverses campagnes d'essais concernant la résistance mécanique, la réaction au feu, l'affaiblissement acoustique, la résistance aux chocs, la durabilité, ...

Pour finir, des actions de formation, de promotion et d'accompagnement à la conception et à la mise en œuvre sont mises en place afin d'encourager l'utilisation des produits et d'encadrer leur mise en œuvre.

## Les produits

Quatre matériaux devraient être produits au sein de la fabrique Cycle Terre dès 2022 :

- les Blocs de Terre Comprimée (BTC) et Blocs de Terre Comprimée Stabilisée (BTCS)
- Les Panneaux de Terre Extrudée (PTE)
- Les Mortiers Enduits de Corps (MEC) et Mortiers Enduits de Finition (MEF)
- Les Mortiers de Pose (MP)



3 ↑ BTC et BTCS



4 ↑ PTE



5 ↑ MEC et MEF



6 ↑ MP

3. Photo · amàco

4. Photo · amàco - R. Anger

5. Photo · CRAterre

6. Photo · CRAterre



## 7 ↑ Sensibilisation et formation

Les maîtres d'œuvres s'intéressent de plus en plus à la terre crue en tant que matériau de construction. amàco est sollicité pour enseigner dans des centres de formation pour architectes, comme ici au GEPA de Lyon.

Photo · amàco - S. Bioul

### Besoins identifiés

Si certains ont pu croire que la construction en terre crue était réservée aux constructions anciennes vernaculaires, aux pays du sud ou à quelques rares auto-construteurs, les architectes et designers contemporains leur donnent aujourd'hui tort en s'emparant de ce matériau millénaire. Les pratiques évoluant rapidement ces dernières années, elles induisent une mutation des besoins en sensibilisation et formation.

Au besoin de faire connaître les matériaux et techniques constructives, de sensibiliser à leurs avantages et de briser les préjugés, s'ajoute la nécessité grandissante d'anticiper les questions techniques, de positionner les matériaux vis-à-vis des normes et d'attirer l'attention sur leurs spécificités menant à des points de vigilance au sein du projet architectural. Si des maîtres d'œuvres et maîtres d'ouvrages non informés ou frileux restent à convaincre, d'autres se lancent sans connaître et prendre en considération les caractéristiques fondamentales des matériaux en terre crue et leur comportement. Les demandes d'accompagnement de la part de concepteurs sont en constante augmentation ; elles arrivent cependant généralement trop tard dans le processus de projet, à un moment où les volumétries et épaisseurs des éléments sont cadencées alors que les enjeux liés à la mise en œuvre des matériaux en terre crue n'ont pas été intégrés. L'utilisation de terre crue dans le projet est alors bien trop souvent vouée à l'échec, puisqu'elle ne peut répondre aux contraintes imposées. Pour voir les projets aboutir, la nécessité

de former les concepteurs en amont est donc apparue comme une évidence. Ainsi les spécificités du matériau peuvent être prises en compte dès l'esquisse.

Outre la compréhension des caractéristiques des matériaux et la connaissance des dispositions constructives et détails techniques, les concepteurs et promoteurs ont besoin d'établir des stratégies viables d'intégration de la terre dans le contexte francilien, à une échelle plus large du bâtiment, et même du projet dans sa globalité. Il leur faut déterminer, selon le contexte spécifique, le meilleur emplacement de la terre au sein du bâtiment et son utilisation optimale.

Cycle Terre propose des formations et accompagnements qui visent à guider les architectes et promoteurs dans leur démarche et à leur donner les clefs pour la définition d'une stratégie pertinente dans le contexte de leur projet. Cet accompagnement vise en outre la bonne compréhension des matériaux et de leur mise en œuvre pour permettre de prévenir les malfaçons et favoriser leur pérennité. Les formations ont bien-sûr vocation à faire connaître en particulier les produits issus de la fabrique et leurs possibilités de mise en œuvre. Leur objectif est aussi de donner une image contemporaine de ces produits, tant du point de vue esthétique que de leurs performances.

Les supports de formation et d'accompagnement ainsi que le guide concepteurs doivent donc, pour répondre aux besoins de Cycle Terre, mettre en avant les qualités des matériaux à base de terre crue, détailler les stratégies de leur intégration et informer sur leurs spécificités pour leur mise en œuvre dans les projets de construction contemporains du contexte climatique, urbanistique et sociologique francilien.

### Un guide généraliste et attrayant

Le premier cahier du guide Cycle Terre à destination des concepteurs (auquel seront intégrées certaines parties de ce document) se veut généraliste, abordant les spécificités génériques de la construction en terre crue tout en évoquant l'ensemble des techniques constructives. Les cahiers suivants développent quant à eux les matériaux Cycle Terre en particulier et leurs possibilités de mise en œuvre.

Le guide, comme l'ensemble des supports de formation et d'accompagnement, doit répondre à l'imaginaire et aux besoins du public cible, les architectes et promoteurs franciliens. Il est ainsi tout d'abord largement illustré, mettant à l'honneur des projets d'architecture contemporains réalisés, idéalement français et urbains. Ensuite, les caractéristiques et prescriptions techniques y sont ciblées pour la mise en œuvre en Île-de-France aujourd'hui, compte tenu des normes, besoins et habitudes constructives actuels.



## Caractéristiques techniques des matériaux

La connaissance des performances des matériaux en terre crue est nécessaire à une bonne conception du bâtiment. Elle permet d'exploiter au mieux les capacités du matériau dans un choix stratégique de mise en œuvre et de comprendre les phénomènes pouvant générer des pathologies ultérieures. Les données quantitatives caractérisant ces performances sont intégrées aux calculs et modélisations mécaniques, hygrothermiques, acoustiques, etc.

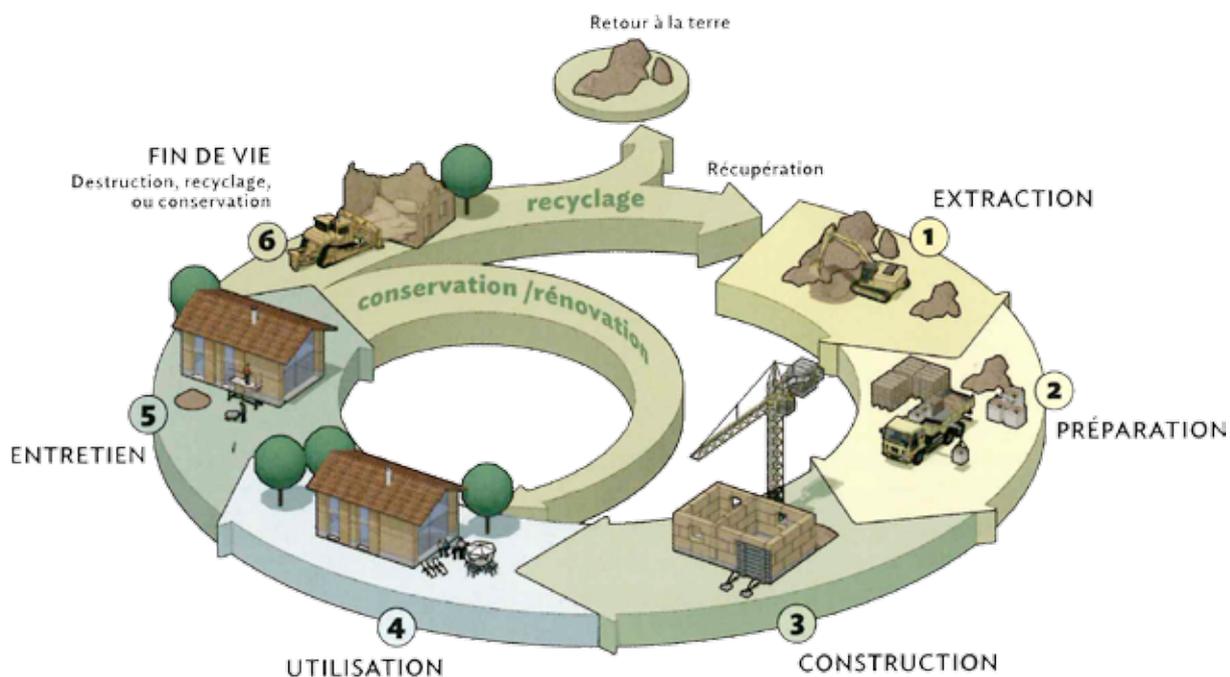
### La garantie Cycle Terre

La variabilité des matières premières et des modes de production influe fortement sur les propriétés finales des matériaux en terre crue. La fabrique Cycle Terre fournit des matériaux de qualité constante aux caractéristiques techniques contrôlées et validées par des essais en laboratoire.

← 1

Installation artistique, *Qui es-tu, brique ?* conçue et réalisée par Gian Franco Noriega et Zoé Tric pour *amàco* à la Biennale d'Architecture de Lyon en 2017.

Photo - amàco - Z. Tric & G. F. Noriega



2 ↑

## Énergie grise et bilan carbone

La terre permet la fabrication de matériaux recyclables à l'infini dont l'empreinte carbone est très faible.

Illustration · CRAterre - A. Misse

Source · *Réhabiliter le pisé : vers des pratiques adaptées* (Moriset, Joffroy, Beguin, Guillaud, Misse, Pointet, 2018)

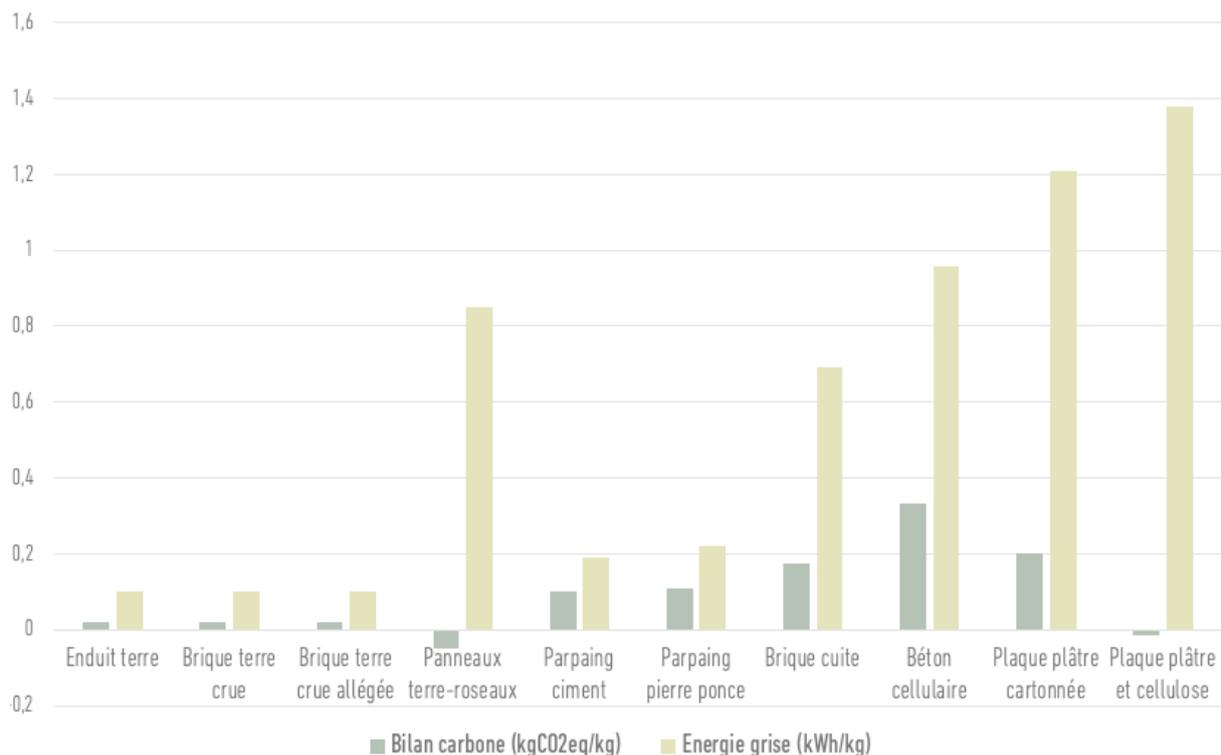
Le secteur du bâtiment serait responsable d'environ 25 % des émissions de gaz à effet de serre et d'environ 40 % de la consommation d'énergie en France\*. L'industrie cimentière serait à elle seule responsable de 2,9% des émissions françaises de gaz à effet de serre et de 6 % du bilan carbone mondial\*\*. S'ils ne peuvent se substituer à tous les matériaux en tout point de l'édifice, les techniques à base de terre crue offrent une alternative qualitative peu énergivore et peu émettrice de carbone dans de nombreuses applications.

Le processus de fabrication des matériaux en terre crue nécessite tout d'abord très peu de transport de matières et matériaux. Le gisement de terre, la fabrication des matériaux et leur mise en œuvre peuvent avoir lieu dans un périmètre très restreint. Dans certains cas, la terre du chantier-même (fondations et terrassements) peut être mise en œuvre sur le site. Le transport est, dans ce cas de figure, pratiquement inexistant. La fabrique Cycle Terre, située à Sevran, valorise quant à elle des terres de déblais des chantiers du Grand Paris. L'utilisation de cette matière première disponible localement et jusqu'alors considérée comme un déchet permet d'éviter la mise en décharge en déchets inertes (ISDI) de plusieurs milliers de tonnes de déblais mais aussi d'éviter une extraction supplémentaire de nouvelles ressources.

La matière est ensuite transformée en matériau avec peu

\* Ministère de la transition écologique, 2017

\*\* Pin, [s.d.]



d'énergie. Bien sûr, cette donnée varie en fonction de la technique constructive choisie et de son degré de mécanisation. Les matériaux produits sont en grande majorité séchés naturellement et sans apport d'énergie, si ce n'est le soleil et le vent. En comparaison, la cuisson de nombreux matériaux de construction (acier, terre cuite, ciment, chaux et plâtre) à de très hautes températures engendre une consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre conséquentes. Dans la fabrique Cycle Terre, le séchage de la terre est réalisé par aération naturelle et celui des matériaux par simple ventilation mécanique.

Durant toute la durée de vie du bâtiment, la terre crue nécessite peu d'entretien. Les reprises sont par ailleurs particulièrement facilitées par la réversibilité du matériau. En effet, une simple humidification permet de remodeler la terre. Les structures peuvent ainsi être réparées, entretenues et modifiées tout en conservant leurs propriétés originelles. On ne peut en dire autant des ouvrages en béton armé dont la réparation est complexe et coûteuse et dont la durée de vie est limitée. Le patrimoine en terre crue multi-centenaire démontre que ces structures que l'on pourrait croire éphémères se montrent in fine particulièrement durables si elles sont bien entretenues.

Finalement, lors de transformations, de la démolition ou de l'abandon du bâtiment, la terre crue est aisément réutilisable. Pour les matériaux ne pouvant être réemployés tel quels, la terre rendue malléable par l'ajout d'eau pourra constituer la matière première de nouveaux matériaux. Si aucune solution de valorisation dans le bâtiment n'est souhaitée, la terre pourra tout aussi bien retourner au sol.

↑ 3

Les matériaux à base de terre montrent un bilan environnemental intéressant : une énergie grise et une production de dioxyde de carbone très faible en comparaison avec les matériaux cuits ou stabilisés au liant hydraulique.

Graphique : amàco, sur base de données tirées de *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre* (Oliva, Courgey, 2010)



4 ↑

### Réversibilité et durabilité à l'eau

Les matériaux à base de terre crue réagissent différemment à l'eau en fonction de leur formulation et de leur processus de fabrication.

Photo · amàco

Ce sont l'eau et l'air qui, au moyen des ponts capillaires, génèrent la cohésion des matériaux à base de terre crue. Le durcissement de la terre s'opère donc par simple séchage et non par prise comme c'est le cas pour les liants hydrauliques. Ainsi, la terre sèche (en apparence) pourra être remodelée par simple humidification. Cette caractéristique est un avantage indéniable, car elle en fait un matériau recyclable à l'infini sans perte de performance. Il peut ainsi être très simplement entretenu, réhabilité ou adapté à un nouvel usage. En fin de course, il retourne tout naturellement à la terre.

Cet atout est aussi la plus grande vulnérabilité des matériaux en terre crue : ils sont particulièrement sensibles à l'eau. En excès, celle-ci réduit la cohésion des matériaux, provoquant une baisse de leurs performances mécaniques.

5 ↓

Le retrait de la terre crue au séchage varie en fonction de sa composition.

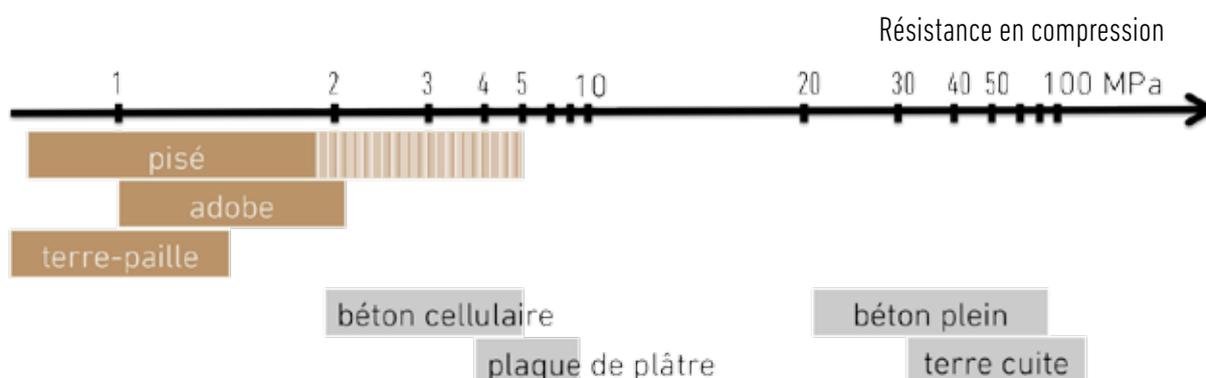
Photo · amàco - F. Barnier



Les matériaux en terre crue peuvent également présenter des variations dimensionnelles importantes. Tout d'abord, les éléments se rétractent au moment de leur séchage. Puis, dans une moindre mesure, ils présentent un gonflement ou un retrait en fonction de l'humidité relative. Une bonne formulation et l'utilisation d'une terre adaptée permettent de minimiser fortement ce phénomène. Les matériaux Cycle Terre sont étudiés pour présenter des variations dimensionnelles minimales.

Les matériaux en terre crue non stabilisée sont par ailleurs susceptibles à la gélivité. Le *Traité de Construction en Terre*\* précise une sensibilité moindre pour le pisé que pour les briques.

\* Guillaud, Houben, Dethier, CRAterre, 2006



Enfin, bien que particulièrement sensibles aux remontées capillaires, les matériaux de terre crue sont généralement peu susceptibles de présenter des efflorescences, tout dépend, bien-sûr, de la composition de la matière première et du contexte de mise en œuvre et de vie du matériau.

La sensibilité à l'eau des matériaux en terre exposée ici demande une étude stratégique de leur intégration ainsi qu'une mise en œuvre éclairée dont nous traitons dans la suite de cet ouvrage. La stabilisation au ciment ou à la chaux permet par ailleurs de réduire la sensibilité à l'eau des matériaux, mais affecte négativement d'autres propriétés telles que la perméabilité à la vapeur d'eau, l'hygroscopicité ou le caractère recyclable de la matière. Les blocs Cycle Terre sont disponibles en terre crue (BTC) et en terre stabilisée (BTCS).

## Résistance mécanique

### Résistance en compression

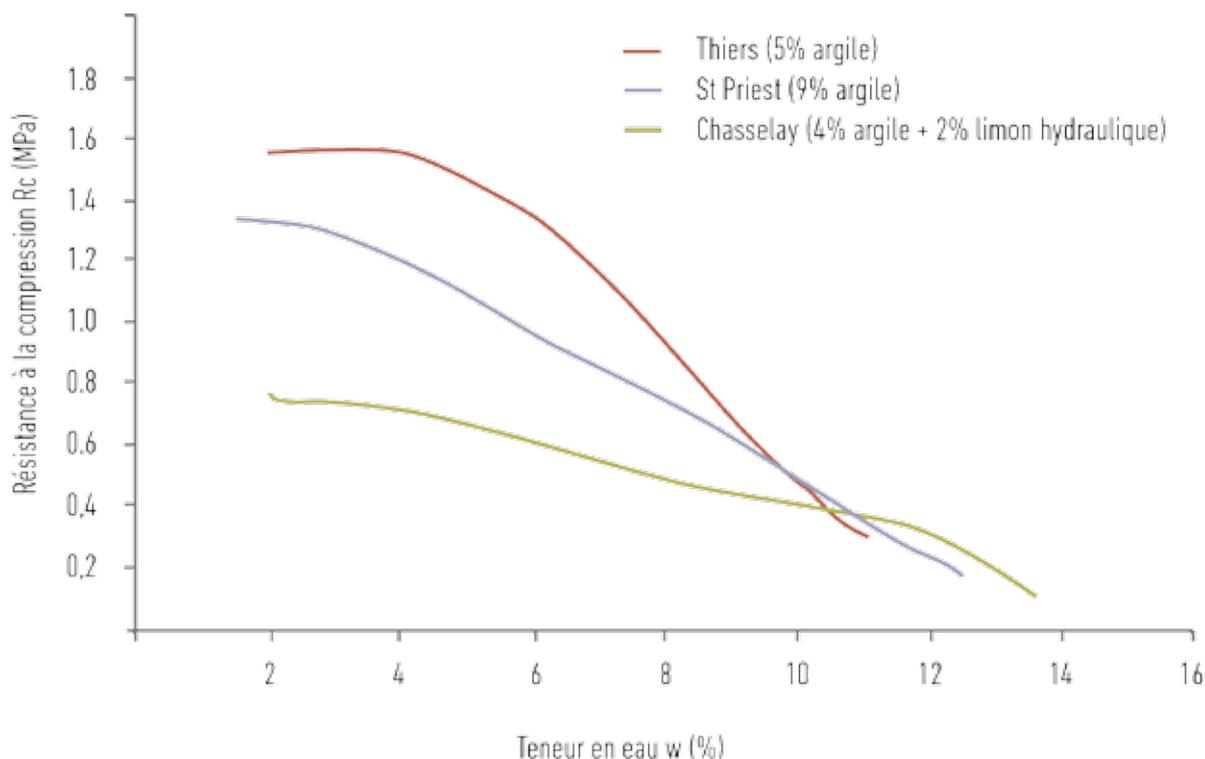
En France, et entre autres à Lyon, les bâtiments construits en terre comportant jusqu'à six niveaux nous montrent, avec plus d'un siècle de recul, la bonne résistance de ce matériau en compression. Dans des conditions de mise en œuvre et de vie classiques, la terre est en mesure de reprendre 1 à 2 MPa. La résistance du béton plein standard jusqu'à 20 fois plus importante est disproportionnée par rapport aux besoins réels dans la plupart des cas. Si la terre ne peut le remplacer dans tous ses usages, elle est parfaitement adaptée pour assumer la fonction porteuse des bâtiments de hauteurs modérées.

↑ 6

Les grains qui composent la terre travaillent très bien en compression. Celle-ci est généralement en mesure de résister à 1 à 2 mégapascals (MPa). Des terres exceptionnelles ou reformulées peuvent aller jusqu'à 5 MPa. En comparaison, le béton plein résiste à des charges dix à cinquante fois plus importantes.

A titre d'exemple, un mur de 30 cm d'épaisseur en terre crue d'un bâtiment de deux niveaux subit une pression en bas de mur d'environ 0,1 MPa majoritairement due au poids propre du mur.

Graphique : amàco, sur base de données tirées de *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : Rapport scientifique* (Moevus, Fontaine, Anger, Doat, 2013)



7 ↑

« La résistance à la compression du pisé diminue avec une teneur en eau croissante. »

La teneur en eau d'un pisé sain, c'est-à-dire sec en apparence, est comprise entre 1 et 3%. Il change de couleur en s'assombrissant dès 5 à 7% d'humidité. En 2012, une façade en pisé effondrée présentait une teneur en eau aux alentours des 12%.

Graphique · amàco, sur base de *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Heitz, Morel, Fabri, Soudani, Champire, Meunier, 2015)

8 →

Les matériaux Cycle Terre ont été testés par des laboratoires indépendants afin d'en certifier les performances.

Photo · amàco

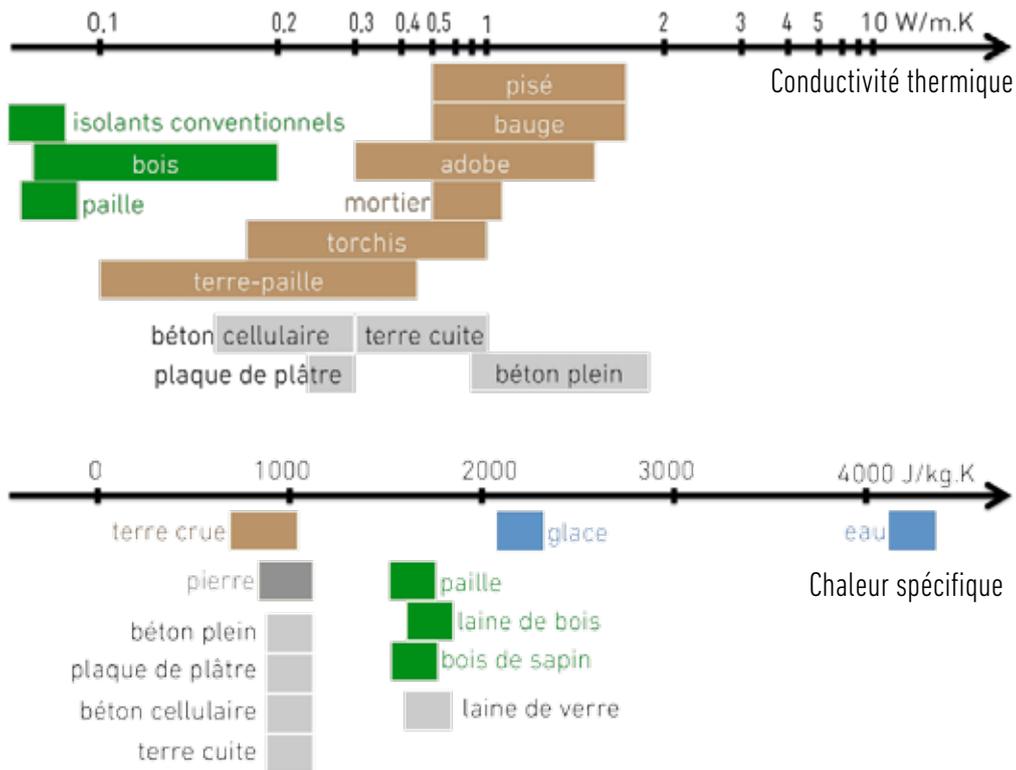
La résistance mécanique des matériaux en terre crue ne peut être dissociée de leur teneur en eau, et donc du contexte de leur mise en œuvre et de leur degré de séchage. En effet, à partir d'une certaine teneur en eau, la résistance à la compression de la terre chute très rapidement avec l'augmentation de la quantité d'eau qu'elle contient. Nous verrons au chapitre suivant que des dispositions architecturales, telles qu'un soubassement et une couverture, permettent de garantir la durabilité des ouvrages.

### Résistance en traction

La terre acquiert sa cohésion lors de son séchage au moyen des ponts capillaires particulièrement efficaces sur les argiles qui disposent d'une grande surface de contact par rapport à leur volume. Cette cohésion, si elle garantit la tenue des éléments de construction à la compression, n'est pas suffisante pour résister à des contraintes de traction modérées. La résistance en traction des matériaux en terre crue est donc considérée comme faible (souvent estimée au dixième de la résistance en compression). L'ajout de fibres permet d'augmenter la résistance en traction des matériaux. Celle-ci varie en fonction de la quantité et des types de fibres ajoutées.

Pour pallier à ce défaut, la construction en terre bénéficiera de l'association judicieuse de matériaux travaillant bien en traction, comme le bois ou l'acier. Ces derniers possèdent une résistance en traction respectivement de plusieurs dizaines et centaines de mégapascals.





### 9 ↑↑ Qualités hygrothermiques

La conductivité thermique d'un matériau ( $\lambda$ ), est sa capacité à conduire la chaleur.

La conductivité thermique de la terre crue est généralement comparable à celle de la terre cuite, soit environ 0,9 W/mK.

Le  $\lambda$  de la terre crue varie fortement en fonction de sa teneur en eau, et donc, du climat.

#### Isolation thermique

La grande conductivité thermique de la terre en fait un matériau très peu isolant. Toutefois, des adjuvants, comme les fibres creuses, permettent de baisser cette conductivité jusqu'à la diviser par dix. On atteint alors des performances d'isolation thermique proches de celles du bois brut.

#### Inertie thermique

Nous distinguons deux types d'inertie, dépendant de facteurs différents bien qu'intrinsèquement liés. L'inertie thermique d'absorption d'un matériau définit sa capacité à réguler l'ambiance intérieure en absorbant et restituant plus ou moins rapidement un apport de chaleur. Elle dépend de la surface d'échange et de l'effusivité du matériau. L'inertie thermique de transmission d'un matériau qualifie quant à elle la vitesse de transmission de chaleur d'une de ses faces à celle opposée. Cette inertie est d'autant plus grande que l'épaisseur du matériau est importante et que sa diffusivité est faible.

En comparaison des autres matériaux massifs de la construction, l'argile dispose d'une grande conductivité thermique. Celle-ci, associée à une haute masse volumique, confère aux matériaux en terre crue une grande effusivité, caractéristique d'une bonne inertie thermique d'accumulation. Mais elle améliore également leur diffusivité, réduisant ainsi leur inertie thermique de transmission.

### 10 ↑

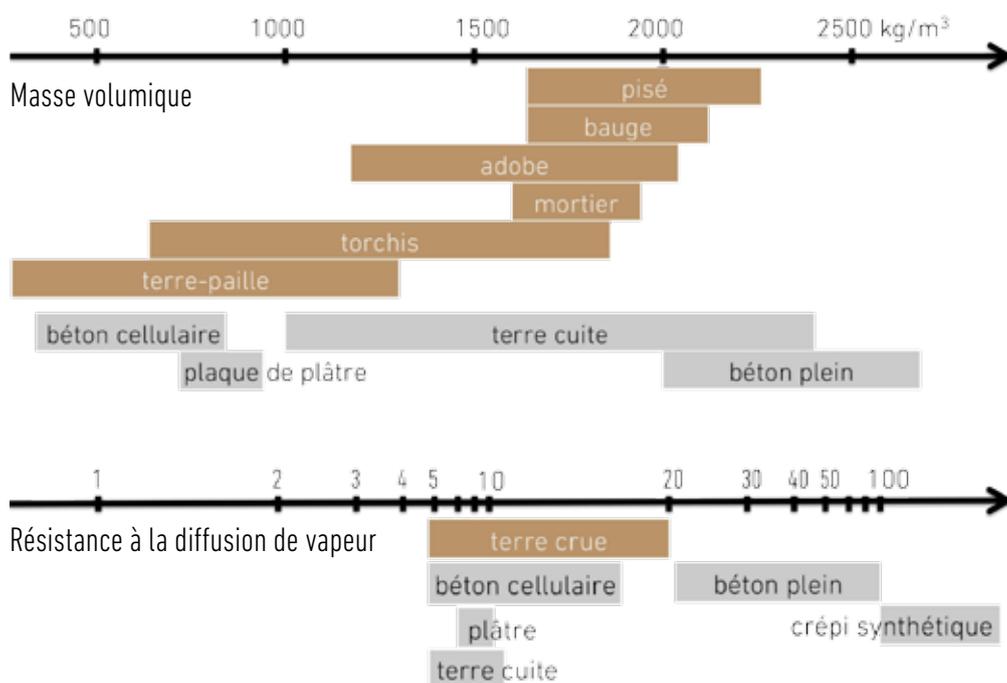
La masse volumique d'un matériau ( $\rho$ ) est sa densité exprimée en  $\text{kg/m}^3$ . La terre mise en œuvre présente une masse volumique de plus de  $1500 \text{ kg/m}^3$  pour la majorité des techniques.

L'effusivité,  $E = \sqrt{\lambda \rho C}$

Elle est exprimée en  $\text{J/m}^2\text{Ks}^{1/2}$ .

La diffusivité,  $D = \lambda / (\rho C)$

Elle est exprimée en  $\text{m}^2/\text{s}$ .



Chacun des facteurs déterminant l'inertie thermique est proche de ceux de la terre cuite et du béton plein. En pratique, la terre crue montre pourtant de meilleures performances que ces matériaux dans ce domaine. En effet, aux facteurs conventionnellement considérés pour mesurer l'inertie s'ajoutent des effets thermiques de chaleur latente liés à la capacité d'échanges hydriques de la terre. Celle-ci se comporte dans les faits comme un matériau à changement de phase (MCP) naturel et écologique. La terre à l'état « sec » contient de l'eau sous forme liquide en équilibre avec la vapeur d'eau contenue dans l'air. Les échanges entre l'eau liquide du matériau et la vapeur d'eau de l'air engendrent un échange de calories permettant à la terre d'agir à la manière d'un climatiseur lorsqu'il fait chaud et à la manière d'un chauffage lorsqu'il fait froid. Ces échanges thermiques et le gain énergétique qu'ils permettent sont constatés en pratique sur des études in-situ, mais ne sont malheureusement aujourd'hui pas pris en compte dans les calculs énergétiques conventionnels.

### Diffusion de vapeur d'eau

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la terre est très variable selon sa mise en œuvre. Un enduit en terre pourra, selon les cas, constituer un frein-vapeur suffisant pour éviter la condensation par diffusion de vapeur d'eau dans la paroi périphérique du bâtiment. L'enduit est d'autant plus étanche à la vapeur d'eau que l'humidité relative intérieure est élevée. La composition de la paroi, le contexte climatique, la quantité de vapeur d'eau produite dans le local, l'épaisseur de l'enduit et sa mise en œuvre sont autant de facteurs à considérer pour déterminer si la terre peut effectivement constituer un frein-vapeur suffisant.

↑↑ 11

La capacité thermique massique d'un matériau, ou chaleur spécifique, ( $C$ ), est sa capacité à stocker de la chaleur par unité de volume. Elle est exprimée en  $J/kgK$ .

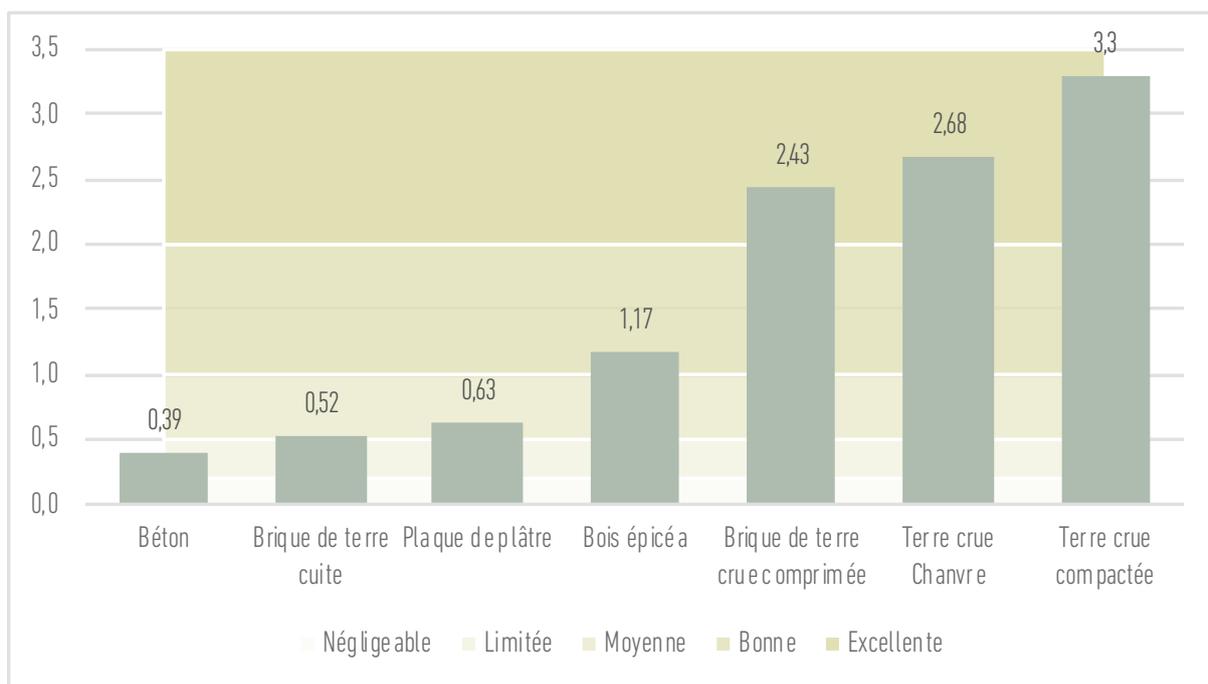
La terre mise en œuvre présente une capacité thermique massique proche de la pierre, du béton, du plâtre ou de la terre cuite.

↑ 12

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau, ( $\mu$ ), indique dans quelle mesure la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau que l'air. Cette caractéristique est donc exprimée sans unités et sa valeur est toujours supérieure à 1.

La terre présente une résistance à la diffusion de vapeur d'eau proche du béton cellulaire, du plâtre ou de la terre cuite.

Graphiques : amàco, sur base de données tirées de *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : Rapport scientifique* (Moevus, Fontaine, Anger, Doat, 2013)



### 13 ↑ Étanchéité à l'air

La Valeur de Capacité de Tampon Hydrique (VCTH ou MBV pour «Moisture Buffer Value») quantifie la capacité d'un matériau à réguler passivement l'hygrométrie intérieure d'un bâtiment. Elle est exprimée en  $\text{kg/m}^2(\%HR)$ .

La terre présente une VCTH exceptionnelle, et notamment largement supérieure à celle du plâtre considéré comme un bon régulateur de l'hygrométrie.

Graphique · amàco

La terre est par contre étanche à l'air. L'enduit intérieur, s'il est bien réalisé, sans fissurations et avec des bandes de raccords périphériques étanches, pourra donc assurer l'étanchéité à l'air. Celle-ci est utile, lorsqu'elle est couplée à une ventilation contrôlée, pour réduire la consommation énergétique, et notamment essentielle pour atteindre le standard « maison passive ». Elle permet également d'éviter la condensation par transport de vapeur d'eau par convection dans la paroi périphérique du bâtiment.

### Régulation de l'hygrométrie

Les matériaux en terre crue disposent d'une exceptionnelle capacité à échanger de l'humidité avec leur environnement, illustrée par leur Valeur de Capacité de Tampon Hydrique (VCTH). En cas de pic d'humidité de l'air, ils emmagasinent l'eau qu'ils restituent lorsque l'air s'assèche. Cette caractéristique en fait des matériaux de premier choix pour réguler l'humidité relative intérieure. La terre améliore ainsi la qualité de l'air intérieur tout en limitant les risques de condensation et de moisissures.

### Propriétés acoustiques

La correction acoustique traite les sons dans le local où se trouve la source, permettant par exemple de réduire l'intensité du niveau sonore perçu par les occupants. L'isolation acoustique quantifie quant à elle la limitation de la transmission d'énergie vers des locaux voisins.

La quantité d'énergie transmise par une paroi (relative à l'isolation acoustique) est indépendante du caractère plus ou moins absorbant de son revêtement (relatif à la correction acoustique).

### Correction acoustique

Les propriétés acoustiques du matériau terre sont encore mal connues aujourd'hui. La terre étant un matériau à porosité ouverte, sa capacité d'absorption acoustique est a priori considérée comme bonne. En effet, une partie de l'énergie acoustique est transformée en chaleur de frottement lorsque les ondes sonores mettent l'air des pores en mouvement. La capacité d'absorption du matériau sera donc d'autant plus importante que sa finition laissera les pores ouverts, sans lissage de la surface. L'adjonction de fibres dans la terre, en augmentant la porosité ouverte du matériau, est également un facteur favorable. Par ailleurs, l'absorption aux fréquences basses augmente lorsque l'épaisseur du matériau augmente.

La terre peut également permettre de former un résonateur, en utilisant un panneau de terre perforé par exemple, mais il s'agit là de performances acoustiques dépendant du dispositif et non du matériau lui-même.

### Isolation acoustique

La masse volumique de la terre crue en fait des matériaux efficaces en matière d'isolation acoustique. La terre peut ainsi améliorer la résistance acoustique de parois légères, comme le faisaient les sables et gravats constituant le marin des planchers anciens.

### Réaction au feu

La terre crue, en tant que matériau minéral, comme la pierre et le béton, est incombustible et classée A1. Si elle est mélangée à une quantité de fibres supérieure à 1% de son volume ou de sa masse, selon le cas le plus défavorable, des essais de réaction au feu doivent être réalisés.

Les dommages dus au feu sont généralement faibles. En cas d'incendie, c'est plutôt l'arrosage par les pompiers puis la stagnation d'eau au sein des gravats qui causent le plus de dégâts sur les structures en terre crue.

### Qualités sensibles

Les matériaux en terre crue sont reconnus pour présenter des qualités esthétiques et haptiques indéniables. La lumière qui s'accroche sur leur surface aux couleurs naturelles attire et calme le regard. Son contact chaud accueille la peau avec douceur. Ils apaisent les sons et contribuent à un air sain.



↑ 14-15

Lors d'un incendie à proximité d'un mur en pisé, une croûte cuite peut se former en surface.

Photos · J. Avons-Bariot

Source · *Au pied du mur : l'architecte expert du bâti ancien en pisé.* (Avons-Bariot, Bardagot, 2016)

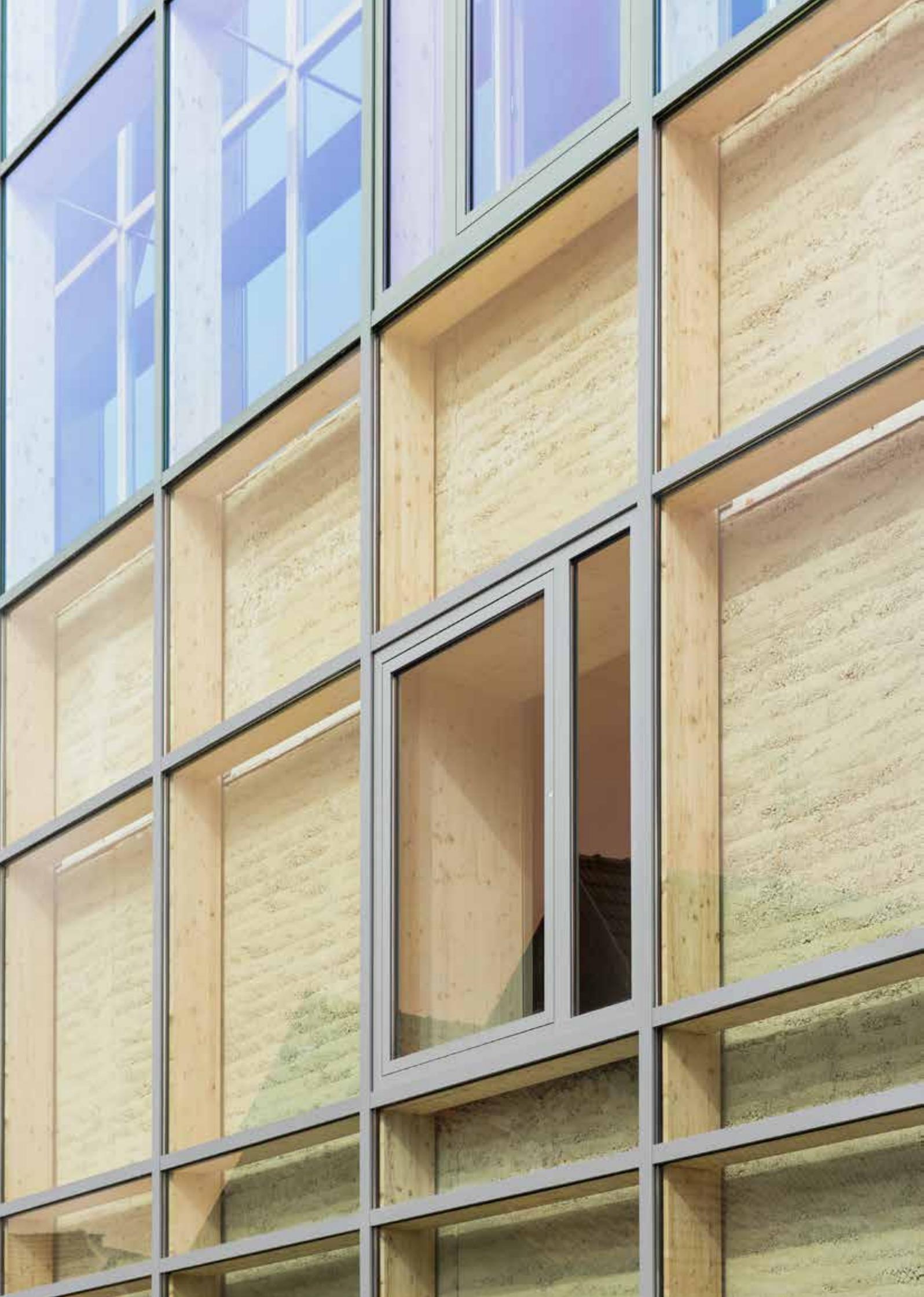
→ 16

La fabrique Cycle Terre caractérise précisément les matières premières disponibles de manière à garantir la constance des caractéristiques techniques des matériaux produits.

Photo · amàco







## Dispositions constructives

La terre crue en tant que matériau de construction comporte de nombreux avantages. Avec une conception adéquate, elle peut être utilisée comme matériau porteur, en remplissage ou en finition. Ses qualités énergétiques, esthétiques ainsi qu'en terme de régulation hygrothermique en font un atout indéniable des architectes.

Mais la terre, en tant que matériau sensible à l'eau et de résistance mécanique modérée, demande également une attention particulière du concepteur. L'enjeu est donc de tirer parti des nombreux atouts de ce matériau tout en garantissant sa durabilité. Pour ce faire, le concepteur étudie les stratégies d'intégration du matériau en fonction de ses caractéristiques dès l'esquisse et veille à la qualité des détails techniques, de leur conception à leur réalisation.

### Sensibilité à l'eau

Les matériaux à base de terre crue sont particulièrement sensibles à l'eau. Leur intégration au sein du bâti doit être étudiée de manière stratégique dès l'esquisse. Le respect des règles de l'art dans leur mise en œuvre est capital pour en garantir la durabilité.

← 1

La grande inertie d'accumulation de la terre en fait un bon matériau pour la réalisation de murs Trombe. C'est l'une des stratégies choisies par nunc architectes au centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen, en France. La réalisation revient à Caracol et Bisceglia pour l'entreprise Rauscher.

Photo · L. Boegly



## Grands principes de conception

### Concevoir à partir de la ressource et du milieu

Nos méthodes de conception et modes de production du cadre bâti sont aujourd'hui fortement influencés par l'avènement du béton armé, matériau exceptionnel qui nous a semblé, un siècle durant, pouvoir répondre à tous nos désirs. Les atouts de ce matériau ne sont plus à démontrer : résistance en traction et en compression, dureté, modularité exceptionnelle, stabilité à l'eau (et même, prise sous l'eau), ... On prend malheureusement aujourd'hui conscience de ses limites : la durée de vie limitée des structures dont les aciers se corrodent et son coût environnemental exorbitant, en matière d'énergie grise, de production de gaz à effet de serre et d'épuisement des ressources naturelles. Entre-temps, nos pratiques se sont acclimatées à cette liberté inouïe offerte par ce matériau : la conception s'est progressivement détachée des ressources et du milieu, pour aboutir à une architecture *internationale*, peu en prise avec les spécificités locales.

Construire en matériaux bio- et géo-sourcés nécessite d'une part de comprendre et accepter les lois naturelles de ces ressources et d'autre part de bien connaître le milieu de leur implantation (précipitations, force et orientation du vent, risques sismiques, ensoleillement, ...). L'architecte inspiré parvient à transcender ces contraintes pour en faire la richesse de l'œuvre architecturale. Pour ce faire, il ne tente pas d'y répondre a posteriori, par des artifices secondaires. Il les intègre plutôt dès l'esquisse et s'y réfère à chaque prise de décision : l'implantation, l'orientation, la volumétrie, la structure, ... jusqu'aux détails techniques.

L'architecture vernaculaire, conçue en réponse aux contraintes des matériaux disponibles et du climat, démontre, avec plusieurs siècles de recul, la durabilité des structures en terre crue. Aujourd'hui, nos manières d'habiter demandent plus de confort et moins d'entretien régulier. Dans ce contexte, le concepteur est d'autant plus attentif à la bonne conception et réalisation des ouvrages. Les écueils typiques des constructions en terre crue sont évités simplement. Peu de règles sont spécifiques au matériau ; les règles de l'art, connues des bons praticiens, restent applicables. Celles-ci prennent cependant une importance décuplée par les risques accrus des conséquences pathologiques : là où la pierre massive développera des salissures ou des mousses, la terre crue pourra s'éroder et mettre en péril la stabilité de l'ouvrage.

La démarche qui montre les meilleurs résultats est bien celle qui vise à concevoir avec intelligence le bâtiment et ses détails en prenant en compte les spécificités des matériaux. Vouloir à tout prix accroître les performances de la terre en elle-même pour lui permettre de répondre à une conception détachée de ses spécificités apporte son lot de complications, ses pathologies propres, et mène souvent à la perte des qualités qui ont

2 ↑↑

La durabilité des structures en terre crue n'est plus à prouver. Les murailles de l'Alhambra à Grenade en témoignent. La terre absorbe très bien les chocs. Les stratèges l'avaient bien compris et préféraient alors la terre à la pierre, plus sujette à l'éclatement sous l'impact de projectiles.

Photo originale · Slaunger

3 ↑

L'architecture vernaculaire répond efficacement aux contraintes matérielles, environnementales et humaines. Leur intelligence reste une source d'inspiration pour une architecture contemporaine frugale.

Photo · CRAterre - ENSAG



fait porter le choix sur ce matériau à l'origine, comme son faible impact carbone ou son caractère recyclable. Il convient donc de concevoir la construction à partir de la terre, en prenant en compte ses atouts et ses spécificités.

### Mesurer l'importance de l'eau

Nous avons vu que l'eau est l'alliée de la construction en terre crue. Indispensable à la mise en œuvre, elle est nécessaire à la cohésion des matériaux. Elle permet aussi de les remodeler après séchage, les rendant recyclables à l'infini. Les structures peuvent ainsi être entretenues, réparées, modifiées ou reconstruites avec la possibilité d'atteindre un résultat de qualité équivalente à l'original.

Pourtant, elle est aussi responsable de la chute des performances des structures en terre crue. La perte de cohésion provoquée par un excédent d'eau est à l'origine de leurs pathologies principales. L'architecture vernaculaire nous montre toutefois la durabilité exceptionnelle du bâti en terre crue. Cela tient notamment du fait que l'eau n'est destructrice que dans des cas bien particuliers. En effet, elle prend un certain temps pour imprégner la terre sèche et dense. Il faut avant tout éviter les flux violents et les concentrations d'eau prolongées. Qu'ils viennent d'en bas (stagnation d'eau), d'en haut (pluie battante et projections d'eau) ou de côté (vapeur d'eau), les échanges d'eau avec la paroi doivent faire l'objet d'une attention particulière. La durabilité des constructions est ainsi assurée par une bonne conception du bâti et des éléments qui le composent.

↑ 4

La toiture de ce *Village d'enfants* à Formoso Do Araguaia au Brésil abrite les lieux de jeux, d'échanges et de circulations tout en protégeant la brique crue. Nous devons la maîtrise d'œuvre de ce bâtiment à Rosenbaum et Aleph Zero.

Photo · C. Palma

Un bon soubassement et une protection de la tête de mur bien pensée sont souvent des mécanismes suffisants pour prévenir des désordres futurs. On dit que le bâtiment doit avoir *de bonnes bottes et un bon chapeau*. Cet adage ne s'applique d'ailleurs pas qu'au bâti dans son ensemble, mais à chacun des éléments qui le composent. Pour chacun, une attention est portée à sa protection à l'eau en base et en tête.

L'exposition de la terre crue aux projections d'eau, que ce soit en façade ou au sein de pièces d'eau, est déconseillée, voire proscrite. Si une implantation en façade est choisie, les toitures débordantes, balcons et coursives sont des éléments constructifs courants qui permettent de l'abriter.

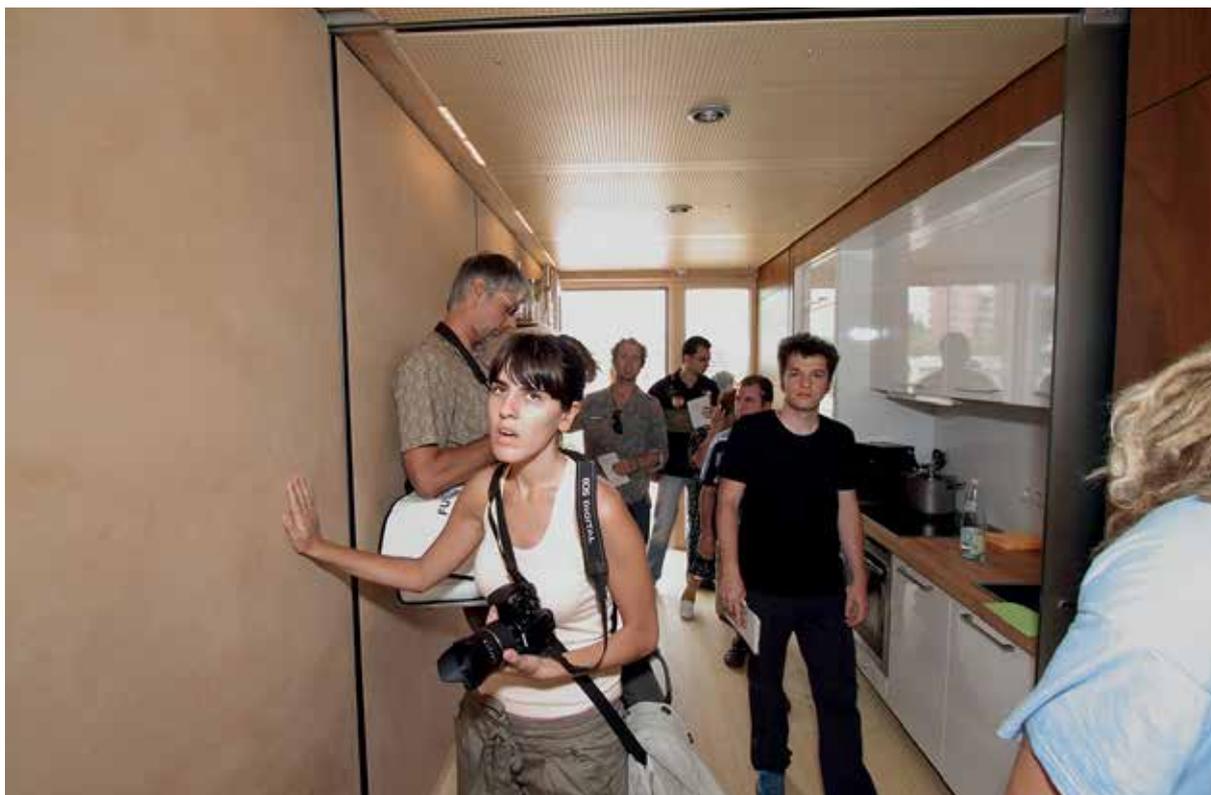
Aujourd'hui, la volonté de réduire notre consommation énergétique nous pousse par ailleurs à complexifier les compositions de parois de façades. Le concepteur doit être attentif à la composition de ces parois, en assurant le potentiel de séchage du mur et en évitant les risques de condensation interne.

Les facteurs de dégradation et dispositions constructives spécifiques liés à la gestion de l'eau dans les bâtiments en terre crue sont abordés avec plus de précisions dans la suite de ce chapitre.

### **Proposer la simplicité au-delà de la complexité**

Loin d'une solution simpliste qui négligerait la prise en compte de l'ensemble des contraintes et opportunités, le projet idéal présente une certaine simplicité résultant de la synthèse efficace de tous les enjeux en transcendant leur complexité. En effet, outre l'adhésion au concept de frugalité qui relève de la subjectivité, les complications constructives sont aisément sources de pathologies. La sobriété du plan, de la volumétrie, des façades, des compositions de parois et des détails techniques permet de diminuer les coûts (économiques et environnementaux) tout en réduisant les risques de dégradations.

Cette frugalité se retrouve également naturellement dans le choix des matériaux. L'objectif est bien de placer *le bon matériau au bon endroit*, en mettant en regard les besoins identifiés et les performances du matériau. Les matériaux résistant aux chocs, aux frottements et à l'eau seront adoptés pour le soubassement, tels la pierre naturelle, le béton de ciment ou la brique cuite. Ceux de faible effusivité, comme le bois, seront préférés pour accueillir le contact avec la peau, comme la main courante. Les éléments qui reprennent bien les efforts en flexion feront de bons linteaux, comme les poutres de bois, de métal ou de béton de ciment armé. La terre sera quant à elle idéalement mise en œuvre où ses qualités esthétiques, haptiques et de régulation hygrothermique seront valorisées, et où ses faiblesses, telle la faible résistance à l'eau et aux frottements, ne seront pas pénalisantes.



## Tirer parti des propriétés hygrothermiques

Nous avons vu que les matériaux à base de terre crue présentent un bilan énergétique et carbone exemplaire qui leur permet de réduire l'énergie grise de construction de manière intrinsèque. Leurs propriétés hygrothermiques sont par ailleurs un atout pour réduire la consommation énergétique d'usage du bâti liée à la climatisation, au chauffage et à la ventilation. En effet, la terre crue peut contribuer à harmoniser les températures et l'hygrométrie intérieures, en été comme en hiver. Outre les économies d'énergie, cette capacité de régulation améliore le confort en favorisant une ambiance intérieure agréable et saine. Ce potentiel sera plus ou moins exploité, voire totalement ignoré, selon les choix stratégiques et constructifs établis.

La terre crue est avant tout intéressante pour son inertie thermique. Aux facteurs conventionnellement considérés pour la quantifier, tels que la diffusivité et l'effusivité, il faut ajouter les effets thermiques de chaleur latente déjà explicités. Si l'impact de ce changement de phase est faible sur la température de l'air intérieur, il est important sur celle de la surface de la paroi. Or la température ressentie est conventionnellement admise comme la moyenne entre la température des parois et la température de l'air. Les parois en terre crue, restant plus fraîches dans les heures chaudes, et plus chaudes dans les périodes fraîches, participent activement au confort thermique des occupants.

Les matériaux en terre crue sont particulièrement adaptés dans les bâtiments à usage continu pour leur forte inertie thermique d'accumulation. Pour garantir leur efficacité dans ce contexte, ils sont placés à l'intérieur de l'enveloppe isolée, où ils peuvent

↑ 5

Les parois en terre de l'*Armadillo Box*®, le module expérimental conçu et construit par les étudiants de L'ENSA de Grenoble dans le cadre du Solar Décathlon en 2010, permettent le rafraîchissement efficace du logement.

Photo · ENSAG/INES/GAIA

$$T^{\circ} \text{ de confort} = \frac{T^{\circ} \text{ parois} + T^{\circ} \text{ air}}{2}$$

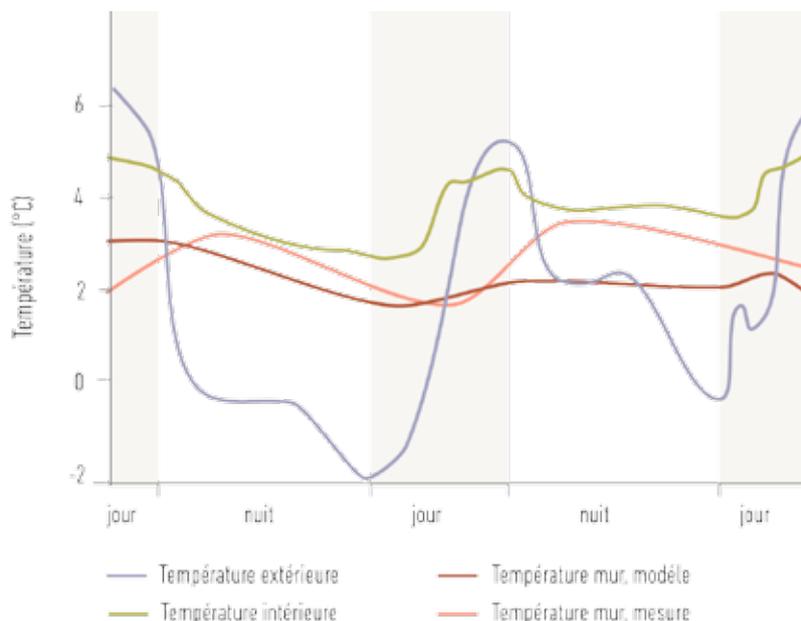
L'inertie, en déphasant et amortissant l'amplitude des variations de température intérieure, améliore particulièrement le confort thermique en période estivale, quand les variations de température extérieure sont importantes. Pour assurer le confort thermique toute l'année et limiter les besoins énergétiques, l'isolation thermique des façades reste nécessaire.

L'étude réalisée par le LGCB de l'ENTPE sur une habitation inoccupée aux murs périphériques de 50 cm en pisé montre un déphasage entre les variations de température extérieure et celles du mur qui n'est pas expliqué par la méthode de calcul conventionnelle.

On observe également que la baisse de température intérieure durant la nuit est limitée par la restitution de chaleur des murs en pisé.

Finalement, la moyenne entre la température de l'air et celle des parois (correspondant à la température ressentie par un occupant) reste relativement stable malgré les variations de température extérieure.

Graphique · amàco, sur base de *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Heitz, Morel, Fabri, Soudani, Champire, Meunier, 2015)

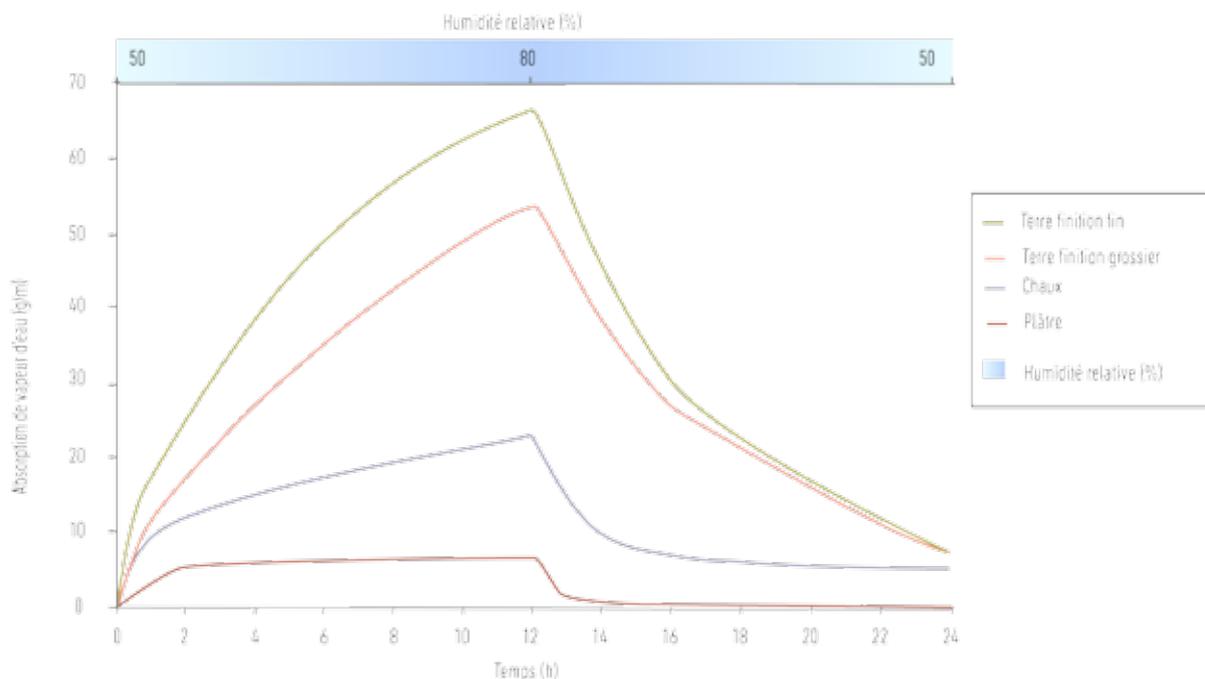


jouer pleinement leur rôle de *réservoir thermique*, en accumulant et restituant la chaleur en fonction notamment des fluctuations de la température intérieure. Une paroi judicieusement placée à portée des rayons du soleil permet une régulation des variations thermiques du logement avant même que la température de l'air intérieur n'augmente. Dans un logement occupé en continu, elle va ainsi permettre une amélioration du confort thermique et une baisse de la consommation énergétique en été, pour le refroidissement, comme en hiver, pour le chauffage. Notons qu'en cas d'occupation intermittente d'un local cette inertie, en ralentissant le chauffage ou le refroidissement de l'ambiance intérieure, peut générer de l'inconfort ou une surconsommation. L'inertie thermique par absorption dépendant de la surface d'échange, les éléments de grande surface, moins compacts, sont les plus efficaces.

En théorie, l'inertie par transmission de la terre crue est quant à elle faible puisque cette dernière dispose d'une bonne conductivité thermique. En pratique, diverses études in-situ montrent que l'efficacité de la terre crue en façade est sous-estimée par calcul. Les effets thermiques de chaleur latente non intégrés aux modélisations n'y sont certainement pas étrangers. Certains concepteurs s'appuient sur ces études pour proposer des façades massives en terre crue non isolées en France et ailleurs dans le Monde. Tablant sur une bonne inertie par transmission du matériau, ils comptent sur la capacité du matériau à ralentir les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur pour garantir le confort thermique et limiter la consommation énergétique. Attention cependant, contrairement aux isolants thermiques qui permettent de limiter le flux de chaleur entre deux

Idéalement, les parois du périmètre du bâtiment doivent avoir une grande capacité d'inertie par transmission, soit une faible diffusivité. Les matériaux situés à l'intérieurs de l'enveloppe doivent avoir une grande capacité d'inertie d'accumulation, soit une forte effusivité.

Les différents concepts associés à l'inertie thermique des matériaux sont explicités précédemment au chapitre *Caractéristiques techniques des matériaux*



faces en tout temps, l'inertie par transmission n'est effective qu'en milieu dynamique, c'est-à-dire lorsque des variations de température importantes se manifestent. Ce type d'inertie est donc surtout efficace pour éviter la surchauffe en été et à la mi saison, alors que l'isolation thermique permettra en sus d'améliorer le confort thermique et de limiter les besoins en chauffage en hiver. Contrairement à l'inertie d'accumulation, à privilégier dans les bâtiments à usage continu, cette inertie par transmission est efficace quelle que soit la fréquence d'utilisation du lieu. L'épaisseur en étant un facteur déterminant, le concepteur veille à augmenter l'épaisseur des parois de façades autant que possible.

L'inertie thermique n'est pas le seul atout de la terre crue pour le confort. Nous avons vu que l'exceptionnelle capacité de la terre crue à échanger de l'humidité avec son environnement en fait le matériau idéal pour réguler l'humidité relative intérieure. Un enduit en terre crue de quelques centimètres d'épaisseur suffit à jouer le rôle de régulateur hydrique. Le renouvellement d'air peut ainsi être limité aux autres besoins sanitaires tels que l'évacuation du dioxyde de carbone.

Outre l'amélioration de la qualité de l'air intérieur, cette caractéristique permet de limiter les risques de condensation et moisissures. Elle fait de la terre le matériau idéal d'intégration de techniques de refroidissement et de chauffage. En effet, les tuyaux de refroidissement d'une climatisation murale pourront être intégrés au matériau terre sans engendrer les pathologies connues lors de l'utilisation d'autres matériaux comme le plâtre. Une attention particulière doit par contre être apportée à l'isolation du tuyau à la sortie du panneau.

↑ 7

Les enduits de terre crue sont particulièrement efficaces pour réguler l'hygrométrie des espaces clos.

Graphique : amàco, sur base de *Terre et confort intérieur - l'équilibre* (Ziegert, 2008)

→ 8

Sur l'*Armadillo Box*®, le module expérimental conçu et construit par les étudiants de L'ENSA de Grenoble dans le cadre du Solar Décathlon en 2010, des tuyaux d'eau (froide ou chaude selon l'usage) ont été intégrés dans les panneaux de terre muraux. De telles installations admettent généralement une différence de température entre l'eau et l'air de trois à quatre degrés. Dans le plâtre, une température d'eau plus basse génère de la condensation et des moisissures. Sur ce prototype, la différence de température a été poussée jusqu'à dix degrés sans qu'aucun problème de condensation ne soit constaté dans le panneau.

Photo : ENSAG/INES/GAIA







## Principaux facteurs de dégradation

### Sensibilité à l'eau

La perte de cohésion provoquée par un excédent d'eau est à l'origine des pathologies principales des structures en terre crue, mais des dispositions architecturales permettent de garantir la durabilité des ouvrages.

La terre est particulièrement affectée par les concentrations d'eau sur la durée et les flux continus ou violents. La conception anticipe donc et prévient ces risques.



### L'eau stagnante

Les stagnations d'eau et remontées capillaires éventuelles fragilisent les ouvrages en terre crue. Ainsi, si un mur repose directement sur un sol détrempe, la dégradation de ses propriétés mécaniques peuvent mener à sa ruine. Diverses précautions sont prises pour se prémunir de tels risques, comme l'aménagement et le drainage des abords, un bon soubassement et une rupture capillaire.

La vigilance du concepteur ne doit pas se limiter au pied du mur de façade : elle doit être étendue à l'ensemble de la structure, et en particulier à chaque changement de plan et chaque interface entre matériaux différents.

C'est particulièrement le cas sur la façade en terre, où l'on doit éviter la stagnation d'eau de pluie en tout point. Les détails d'encadrement de baies en particulier sont conçus avec attention. Les raccords sont par ailleurs idéalement traités à l'aide de solins et contre-solins, comme le veulent les règles de l'art.

Aussi, étanchéifier les faces du mur accentue un éventuel phénomène de remontées capillaires préexistant, augmentant leur hauteur et la quantité d'eau maintenue dans la structure. La finition perdra généralement son adhérence au support en terre crue, et, dans le meilleur des cas, se décrochera du mur qui pourra commencer à sécher. Une finition étanche maintenue en place peut quant à elle engendrer une accumulation de l'humidité au point de mettre la stabilité du mur en péril. Aux finitions étanches, le concepteur préfère donc les enduits perspirants qui permettent au mur d'évacuer son humidité excédentaire.

Le concepteur est également attentif à ces détails dans les parties couvertes. Par exemple, la base des murs porteurs intérieurs est également traitée de manière à éviter les remontées capillaires.

Les détails bien conçus évitent ainsi la stagnation d'eau et les remontées capillaires en tout point de l'édifice mais aussi à tout moment. Ainsi, durant la phase de chantier, des protections temporaires doivent être mises en œuvre.

9 ↑↑

Les articulations entre matériaux différents doivent être étudiées afin d'éviter la stagnation d'eau et l'érosion différentielle.

Photo · A.-L. Antoine & E. Carnevale, dans le cadre du *Projet Terres Contemporaines*

10 ↑

Les encadrements de baies peuvent potentiellement concentrer de nombreux phénomènes indésirables. Sur ce bâtiment on observe une érosion ponctuelle due au rabattement par le vent de l'eau de pluie rejetée par les appuis de fenêtres.

Photo · P.-E. Loiret

## Le ruissellement concentré

Un ruissellement d'eau concentré peut mener à une érosion importante et, sans intervention, à la ruine d'un ouvrage. Pour l'éviter, le concepteur y prête attention dès l'étude de la volumétrie globale, et ensuite à celle de chaque élément jusqu'aux détails.

Les articulations entre surfaces d'écoulement des eaux et surfaces verticales en terre crue doivent faire l'objet d'une vigilance accrue. Le parcours des eaux de pluie est étudié et celles-ci sont éventuellement récupérées et canalisées. On pense tout d'abord à la base du mur, aux rives contre mur et aux acrotères, lieux où le phénomène serait le plus marqué. Mais, pour des questions esthétiques avant tout, les petites surfaces doivent également être considérées. L'appui de fenêtre, par exemple, est un lieu de concentration d'eau susceptible de générer des phénomènes d'érosion disgracieux.

Durant le chantier, des précautions temporaires supplémentaires doivent être prises pour empêcher, en cas de forte pluie, les points de ruissellements concentrés.

C'est finalement tout au long de la durée de vie du bâtiment que l'utilisateur veillera à l'entretien des toitures, solins, chéneaux, gouttières et descentes d'eau qui peuvent concentrer une grande quantité d'eau en un point lorsqu'ils sont dégradés. Le concepteur est donc, dès l'esquisse, vigilant à la possibilité d'entretenir les ouvrages qu'il conçoit.

## La pluie battante

Une fois les risques d'eau stagnante et de ruissellement concentré écartés, la pluie battante devient une considération secondaire, souvent esthétique plus que structurelle.

C'est le faite de mur qui est le plus exposé aux intempéries. Pour éviter sa dégradation et limiter les besoins d'entretien, il est protégé par une toiture avec débord ou une simple couvertine. Durant le chantier, il est également nécessaire de le protéger de la pluie.

La surface de façade, quant à elle, souffre peu de la pluie battante. En effet, l'eau de pluie sur une façade bien entretenue et bien conçue est tout d'abord absorbée en surface pour s'évaporer ensuite, sans provoquer de dégât. Elle ne s'écoule sur la surface, provoquant une éventuelle érosion, qu'une fois la couche superficielle du mur arrivée à saturation. Lorsque le ruissellement concentré est prévenu, l'érosion de surface est donc très limitée. Il peut cependant être souhaitable de l'éviter, pour une question esthétique ou pour pouvoir réduire au minimum l'épaisseur d'un mur ou d'un parement en terre. Plusieurs stratégies permettent de limiter ce phénomène.

La première consiste à protéger la surface de façade par un débord de toit, une double-peau ou des coursives, par exemple. Le système constructif et la finition de façade doivent ensuite être choisis stratégiquement selon plusieurs facteurs. L'orientation



↑ 11 · 12

Le ruissellement concentré provoqué par une descente d'eau brisée ou mal raccordée mène rapidement à la ruine du mur.

Photos · CRAterre - P. Doat

Source · « Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Mori-set, 2019b)



13 ↑

Sous l'action de la pluie battante en façade, des matériaux de dureté et de capacité d'absorption différentes peuvent générer de l'érosion différentielle. Ici, l'érosion a été accentuée directement sous les lits de chaux horizontaux réguliers.

Photo · P.-E. Loiret

de la paroi et son exposition (abritée ou non au sens du NF DTU 20.1.) sont déterminantes. Le climat (vent, pluviométrie, rayonnement solaire, température, etc.) doit par ailleurs être étudié en prenant en compte les phénomènes de l'échelle urbaine (comme l'effet Venturi). Le concepteur doit finalement être attentif aux pathologies liées à l'érosion différentielle : un matériau plus dur, plus étanche, provoquerait une érosion accrue sur le matériau plus friable qu'il jouxte. Une fois de plus, une attention particulière est portée aux encadrements de fenêtres et à leur articulation avec le mur en terre dont on sait qu'ils peuvent concentrer de multiples pathologies.

Les phénomènes les plus graves adviennent lorsque la pluie battante agit sur une pathologie préexistante ou est associée à un facteur aggravant, comme le vent ou le gel. Les matériaux en terre crue étant gélifs, le système constructif choisi doit garantir la protection ou le séchage rapide du mur ou parement.

### Le rejaillissement et les projections

Les éclaboussures dues à la pluie qui rebondit sur le sol ou les projections à proximité des points d'eau ont des conséquences majoritairement esthétiques. Elles peuvent toutefois devenir critiques, par exemple au niveau d'une base de mur régulièrement percutée par les projections d'eau de véhicules passant sur une voie fréquentée.

Pour prévenir ce phénomène, des dispositifs de protection doivent être mis en place aux endroits à risques. Le soubassement et la plinthe protègent la base de façade et de cloison. Les parois à proximité d'un point d'eau sont protégées par un parement, un traitement de surface ou une finition apposée.

### La condensation de surface

L'air peut contenir une quantité limitée de vapeur d'eau. Lorsque cette limite est atteinte, on dit que l'humidité relative de l'air est de 100%. Lorsqu'elle est dépassée, l'eau excédentaire condense. Cette limite est variable, et dépend notamment de la température de l'air. Plus l'air est froid, moins il peut contenir de vapeur d'eau. Ainsi, lorsque l'air entre en contact avec une paroi dont la température est inférieure à son point de rosée, la vapeur d'eau contenue dans l'air condense.

Dans le bâtiment, ce phénomène peut générer de l'humidité aux points froids de la construction. Il explique notamment la buée sur les vitres en hiver ou sur le miroir de la salle de bain. Lorsqu'il devient pathologique, il favorise le développement de moisissures ou mousses aux points froids de la construction, typiquement aux angles des pièces et au niveau des ponts thermique générés ponctuellement par des matériaux plus conducteurs ou plus fins.

Pour éviter ces pathologies, il faut veiller à une température élevée de la face intérieure de l'enveloppe (isoler l'enveloppe, chauffer sa face interne et éviter les ponts thermiques) et limiter

—  
La pluie battante peut provoquer une érosion diffuse qui engendre rarement des conséquences structurelles.

l'humidité contenue dans l'air intérieur (ventiler et réguler). Or l'exceptionnelle capacité d'échanges hygrométriques de la terre crue permet justement de réguler l'eau contenue dans l'air et de limiter les pics d'humidité. Les pathologies liées à la condensation sont donc fortement limitées dans les constructions en terre par la présence même de ce matériau hygroscopique.

### La condensation interne

Le concepteur ainsi que l'occupant du bâtiment doivent être attentifs à limiter les risques de condensation dans la paroi qui vont limiter les performances thermiques de l'isolation, favoriser le développement de moisissures et réduire les performances mécaniques de la terre crue. Comme dans toute paroi (qu'elle contienne de la terre ou non), la condensation va s'opérer de deux manières : par convection ou par diffusion de vapeur d'eau, la première étant plus courante et plus conséquente. On rappelle cependant à nouveau que la terre, en tant que matériau hygroscopique, permet de limiter les risques de condensation en régulant l'hygrométrie de l'air.

La condensation interne par transport de vapeur d'eau par convection a lieu lorsqu'il y a un déplacement d'air au travers de la paroi. Un air humide peut dès lors entrer en contact avec une surface de température plus basse que son point de rosée et provoquer la formation de condensation dans la paroi. Pour l'éviter, le concepteur veille à une étanchéité à l'air suffisante de la finition intérieure et de tous les nœuds constructifs.

La condensation interne par diffusion de vapeur d'eau est quant à elle provoquée par un flux de vapeur à travers la paroi. Celui-ci s'opère des zones à forte concentration vers les zones à moindre concentration en vapeur d'eau. Il est particulièrement présent en hiver, de l'intérieur vers l'extérieur, et peut parfois exister en été, de l'extérieur vers l'intérieur, en particulier avec l'usage de la climatisation. La vapeur d'eau va condenser lorsque la température du point de rosée est atteinte. Cela advient lorsqu'elle est 'bloquée' par une surface étanche en zone froide. Pour l'éviter, le concepteur étudie et adapte la composition des parois périphériques du bâtiment. Typiquement, les finitions extérieures étanches et l'isolation par l'intérieur sans frein vapeur efficace favorisent la condensation interne en hiver. Cette mise en œuvre constitue donc un facteur aggravant qui, en outre, accentue les remontées capillaires s'il en est et limite le séchage du mur en cas d'infiltrations.

### Les infiltrations techniques

Les infiltrations techniques constituent une cause évidente de dégradation des matériaux en terre crue. Le concepteur peut les limiter par une bonne conception des réseaux, voire, pour une sécurité totale, en évitant l'intégration de réseaux aux ouvrages.



Les enduits étanches de ces maisons en France ne pouvaient pas se maintenir. Les murs en terre doivent évacuer leur humidité.

↑↑ 14

Pont de Beauvoisin

Photo · CRAterre - S. Moriset

Source · « Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Moriset, 2019b)

↑ 15

Photo · L. Boulicot



#### 16 ↑ L'eau de constitution

Des maquettes de sable humide réalisées par les étudiants de l'ENSA de Lyon rendent visibles les fissurations caractéristiques des matériaux de faible résistance en traction.

Photo · Z. Tric

Source · *Concevoir la Matérialité : Les murs de maçonnerie agglomérée* (Anger, Bioul, Tric, 2020)

Les matériaux en terre crue mélangés à des quantités importantes de fibres peuvent être sensibles aux moisissures provoquées par une évaporation trop lente de leur eau de constitution. Les matériaux Cycle Terre, préfabriqués et amenés secs sur chantier permettent d'éviter totalement cette pathologie.

#### Résistance mécanique

Il est nécessaire de concevoir le bâtiment et dimensionner sa structure en prenant en considération la bonne résistance en compression de la terre crue, sa faible résistance en traction et la variabilité de son comportement mécanique en fonction de l'humidité relative. L'organisation judicieuse de la descente des charges et la prise en considération du contexte du mur de terre crue (climat intérieur et extérieur) dans son dimensionnement lui permettent de porter jusqu'à trois niveaux. Les franchissements peuvent être réalisés au moyen d'arcs, voûtes et coupes, ou à l'aide de poutres de bois, béton ou métal, en mesure de travailler en flexion.

#### Les charges réparties

Comme toutes les parois, les murs de terre crue sont sujets au flambement : lorsque la structure est compressée dans le sens de la longueur, elle a tendance à fléchir perpendiculairement à l'axe de la force appliquée. Pour bien dimensionner le mur et ainsi en éviter le flambement on en contrôle l'élançement, soit un rapport entre la hauteur et l'épaisseur.

La résistance à l'écrasement des structures en terre crue est quant à elle vérifiée, comme pour les autres parois, par le calcul de l'effort normal mis en relation à la contrainte admissible.

Ce dimensionnement est d'autant plus important que le matériau présente une résistance limitée. Les baies peuvent générer des concentrations d'efforts et des efforts obliques sur certaines portions de la façade difficilement repris par la terre crue. Ceux-ci peuvent générer des fissures allant de simples considérations esthétiques à la mise en péril de la structure. Les trémies techniques, réservations et saignées peuvent également fragiliser le mur.

Les nœuds constructifs comme les liaisons de murs en T et en L ou l'appui du plancher sur le mur sont également le siège de phénomènes spécifiques. Des fissures peuvent par exemple apparaître entre mur et contreforts. Par ailleurs, la dilatation et le fluage d'un plancher peuvent provoquer une fissuration en façade et un écrasement côté intérieur. Ce sont donc des détails qu'il faut particulièrement étudier pour garantir la stabilité mais surtout l'esthétique du résultat.

Enfin, une attention particulière est portée aux parois de terre crue durant leur construction car elles n'ont alors pas encore atteint les caractéristiques prises en compte pour leur dimensionnement. Tout d'abord, le matériau ou les joints encore humides n'ont pas leur résistance finale acquise une fois secs. On veille donc à respecter les hauteurs de levées prescrites pour les maçonneries. Ensuite, l'élançement final de la structure peut être dépassé temporairement en cours de chantier. En effet, le dimensionnement prend en compte l'influence positive de la jonction du mur en tête avec d'autres éléments comme un chaînage ou un plancher (liaison par encastrement, rotule ou libre). Or la paroi peut être maçonnée avant la mise en place de ces éléments. L'élançement qui a servi à dimensionner la paroi est alors dépassé temporairement et la résistance de l'ouvrage compromise jusqu'à ce que le chaînage ou le plancher soit mis en œuvre.

### Les charges ponctuelles

En concentrant les efforts, les charges ponctuelles génèrent des phénomènes spécifiques comme le poinçonnement, responsable des fissures à 45° sous les appuis de poutres. Un asselet (ou achelet) permet de les éviter, comme c'est le cas également dans d'autres maçonneries non armées. Les piédroits de baies de grande portée nécessitent également un renforcement.

### Les mouvements structurels

Ce facteur de dégradation s'applique aux parois non porteuses sur lesquelles les mouvements de la structure primaire, fluage par exemple, ont des répercussions. Ces phénomènes ne sont pas spécifiques aux matériaux en terre crue et trouvent de nombreuses descriptions dans la réglementation. La déformation de



↑↑ 17

La maquette de sable fait apparaître des *fissures en moustache* naissant de manière oblique aux angles des baies et des fissures de cisaillement au droit de percements trop larges. Ces fissurations sont bien connues des professionnels de la construction en terre crue. En effet, la faible résistance du matériau en traction demande la prise de précautions particulières, en particulier au droit des baies qui génèrent des concentrations d'efforts sur certaines portions de la façade, et des efforts obliques.

Photo · R. Anger

Source · *Concevoir la Matérialité : Les murs de maçonnerie agglomérée* (Anger, Bioul, Tric, 2020)

↑ 18

Le phénomène de poinçonnement est responsable des fissures à 45° sous les appuis de poutres. Pour les éviter, on place un asselet (ou achelet).

Photo · L. Boulicot

la poutre ou du plancher supérieur et/ou inférieur provoque des fissures caractéristiques dans les maçonneries non porteuses. Les stratégies mises en place afin d'éviter ces phénomènes sont similaires aux autres techniques de construction non porteuses.

#### Les mouvements de sol

Les matériaux de terre crue ne sont pas en mesure de reprendre des efforts de traction générés par un tassement différentiel des sols de support. Ces derniers peuvent entraîner la fissuration, voire la déstabilisation du mur. Les fondations sont donc dimensionnées pour répartir les efforts et éviter ces phénomènes de tassements différentiels.

### Stabilité

Comme toute structure, les ouvrages en terre sont sujets au renversement. Celui-ci peut être causé par des charges excentriques verticales, comme un appui de plancher désaxé, ou par des efforts horizontaux, conséquence d'une charpente dont l'entrait serait endommagé, du vent ou des séismes par exemple. La stabilité de la structure peut être garantie par sa forme ou par le système dans lequel elle est intégrée.

#### Les charges excentriques verticales

De manière générale, on évite autant que possible une excentricité importante des charges verticales. Le détail d'appui désaxé d'un plancher sur un mur doit être pensé en prenant en compte la faible résistance de la terre, en particulier en traction.

#### Les poussées horizontales

Le risque principal concernant les cloisons et remplissages est le même pour toutes les techniques : leur renversement. Pour l'éviter, le concepteur prévoit leur maintien à l'ossature sur leur périmètre.

Pour ce qui est des murs porteurs, des chaînages verticaux, horizontaux et des armatures peuvent venir renforcer la structure. Les dispositions du NF DTU 20.1 et des eurocodes sont d'application. Dans le cas d'intégration d'armatures, le concepteur est attentif aux risques de corrosion des métaux dans la terre crue.

#### Les séismes

Les structures porteuses en terre crue ne permettent pas de rencontrer les standards réglementaires européens en région sismique. La terre crue est cependant très pertinente dans ce contexte lorsqu'elle est associée à d'autres matériaux. En effet, des techniques mixtes comme le torchis montrent de très bonnes caractéristiques parasismiques. On retrouve dans l'architecture vernaculaire une variété de dispositifs techniques parasismiques performants dont on peut aujourd'hui s'inspirer.

## Variation dimensionnelle

La terre crue se rétracte au séchage et gonfle avec l'humidité. Ce phénomène s'opère sur les ouvrages, verticalement et horizontalement, de manière importante lors de leur mise en œuvre et dans une moindre mesure avec les variations hygrométriques de leur environnement.

Le retrait vertical provoque, sur les techniques de mise en œuvre à l'état plastique, une réduction importante de la hauteur de la levée, puis de celle du mur. On compte par exemple environ 2,5% de retrait vertical sur un mur en bauge. Il est bien moindre sur les murs de briques maçonnées, dont seul le joint doit encore sécher. Négliger ce phénomène peut tout d'abord mener à une hauteur de mur inférieure à la hauteur désirée. L'intégration d'éléments rigides avant séchage complet, comme des encadrements de baies, peut par ailleurs générer des fissures par le blocage du retrait. Il est finalement nécessaire de prendre des précautions particulières lorsqu'un tassement ou retrait différentiel est possible, comme lorsque le soubassement évolue en escalier ou lorsque des parois de différentes natures doivent être liées, perpendiculairement ou dans le même plan. Des fissures peuvent apparaître à la jonction entre éléments de différente nature ou de différente hauteur. L'un des atouts des produits Cycle Terre est qu'ils sont mis en œuvre secs sur chantier, limitant ainsi les risques liés à ce phénomène (seul le mortier fait du retrait).

Les variations dimensionnelles horizontales provoquent quant à elles des fissures verticales régulières. Elles sont évitées (ou dirigées) en créant des joints de dilatation verticaux.

Par ailleurs, les associations de matériaux ayant des caractéristiques différentes, sont généralement à l'origine de fissurations. On observe tout d'abord un décollement à l'interface entre les matériaux. Ces fissurations au niveau de matériaux différents peuvent aussi s'étendre dans le mur en terre lorsque la rigidité de l'un freine le mouvement de l'autre. On observe parfois ces fissures disgracieuses au niveau de l'harpage avec un matériau plus rigide ou aux angles d'encadrements de baies rigides.

Les baies sont un point de vigilance particulier. La rigidité de certains éléments comme le cadre, le linteau ou l'appui amène souvent des fissures disgracieuses. Une bonne conception et un détail bien pensé intégrant notamment des joints de mouvement aux bons endroits apportent une réponse architecturale à ce phénomène.

## Résistance à l'arrachement

Si les petites charges ne posent pas de question particulière, les ancrages destinés à maintenir des équipements plus lourds, des menuiseries ou la toiture, sont à étudier avec attention du fait de la faible résistance en traction des matériaux en terre crue. Dans chaque cas, des solutions techniques et architectu-



↑↑ 19

Les fissures d'angle témoignent de la désolidarisation des murs. Celle-ci peut être due à un défaut de chaînage et/ou de charpente, éventuellement aggravé par un mouvement de sol.

Photo · J. Avons-Bariot

Source · *Au pied du mur : l'architecte expert du bâti ancien en pisé.* (Avons-Bariot, Bardagot (dir), 2016)

↑ 20

Les tassements ou retraits différentiels peuvent provoquer des fissures disgracieuses au droit des linteaux et des allèges.

Photo · CRAterre - S. Moriset

Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)



rales existent, comme les pièces d'ancrage ou de scellement, les encadrements renforcés ou les chaînages. Elles sont d'autant plus pertinentes qu'elles ont été anticipées dès la phase de conception.

## Durabilité aux chocs et frottements

### Le passage répété et les impacts

La terre est sensible à l'abrasion et aux chocs. Les surfaces, et surtout les angles saillants, peuvent donc souffrir du passage répété des personnes et des véhicules, des coups d'objets transportés par le vent, de l'abrasion volontaire, ... Le concepteur veille, dans les lieux exposés, à protéger la surface et surtout ses angles saillants des parois et finitions en terre.

### La faune : insectes et rongeurs

L'établissement d'insectes et rongeurs dans les murs en terre est un phénomène souvent mentionné mais très peu rencontré. Il n'apparaît qu'en conséquence de pathologies préexistantes. De plus, peu d'animaux constituent une menace pour la structure du mur. Les oiseaux et les chauves-souris par exemple, sont totalement inoffensifs. Les nids de guêpes n'engendrent quant à eux pas de pathologies majeures. Les termites s'attaquent au bois, non à la terre. Toutefois, les éventuelles fissures ou l'espace caractéristique entre un enduit étanche et le mur sont des interstices qui favorisent leurs déplacements. Ce sont finalement les petits rongeurs qui peuvent éventuellement creuser des galeries au pied du mur, mais ceux-ci ne s'installent dans les murs que si la végétation les dissimule.

On peut donc en conclure qu'un mur sec et sain, sans fissures, sans finition étanche et sans végétation proche n'est pas affecté par la faune.

21 ↑↑

Les structures en terre souffrent des chocs et frottements répétés.

Photo · CRAterre - S. Moriset

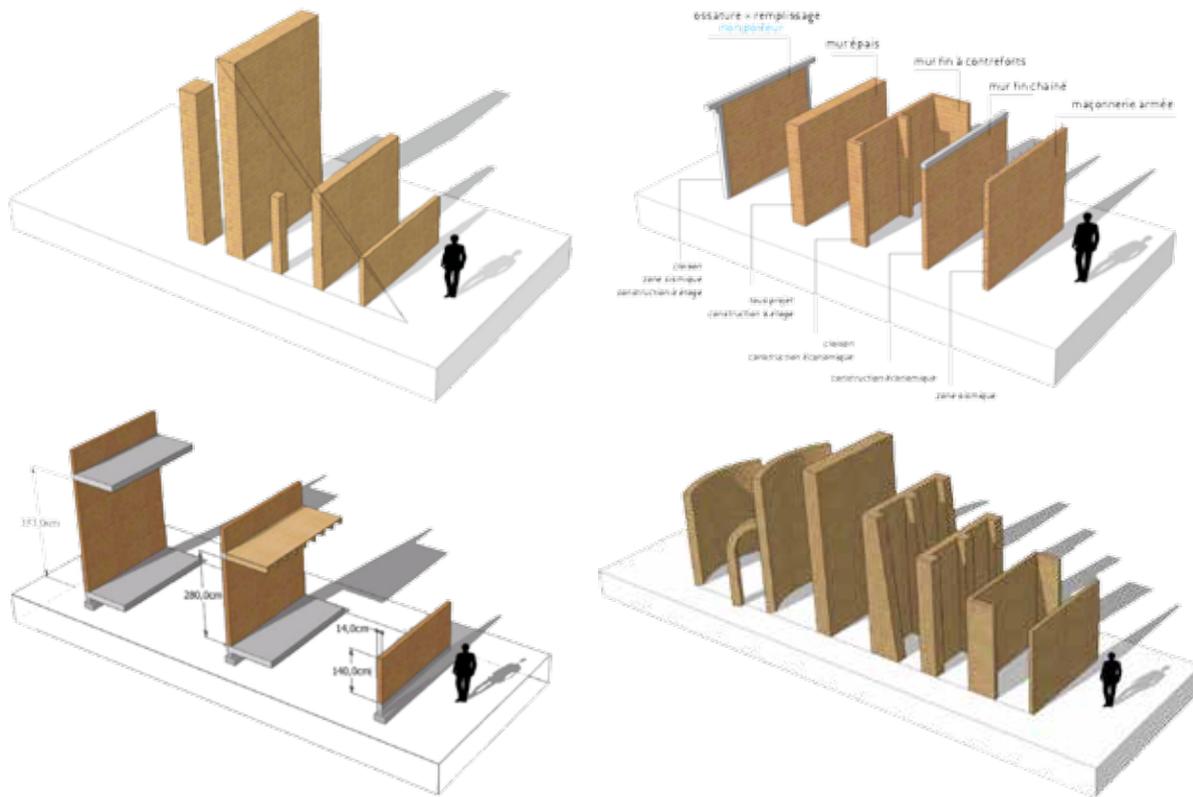
Source · «Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Moriset, 2019b)

22 ↑

Les nids de guêpes n'engendrent pas de pathologies majeures sur un mur sain. (Moriset, 2019b)

Photo · CRAterre - S. Moriset

Source · «Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Moriset, 2019b)



## Dispositions constructives par élément

### Parois verticales · généralités

#### Dimensionnement, mouvements et joints de fractionnements

Les parois verticales en terre crue sont dimensionnées au flambement, à l'écrasement et à la stabilité de la même manière que les autres parois maçonnées. Tout d'abord, pour éviter le flambement de la structure, on en calcule l'élançement, soit le rapport entre la hauteur et l'épaisseur. Celui-ci prend en compte la *hauteur effective* et l'*épaisseur effective* en appliquant à chaque valeur des facteurs correctifs. La *hauteur effective* dépendra des jonctions du mur en pied et en tête avec d'autres éléments tels que chaînages et planchers (encastremets, rotules ou libres). L'épaisseur effective prendra en compte la présence de contreforts et refends. L'élançement d'un mur doit toujours être inférieur à 20, et une valeur plus restrictive peut s'appliquer en fonction des cas. Les cloisons peuvent quant à elles présenter un élançement plus important selon le système constructif dans lequel elles s'intègrent. Le *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue\** définit des méthodes de dimensionnement au flambement pour le pisé et la bauge. La résistance à l'écrasement des structures en terre crue est quant à elle vérifiée, comme pour les autres parois, par le calcul de l'effort normal mis en relation à la contrainte admissible. Pour finir, la stabilité de la structure peut être garantie par sa forme : épais-

\* ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018

↖ 23

Différents éléments présentent le même élançement. Le rapport entre leur hauteur et leur largeur reste inchangé.

↖ 24

Différentes portions de murs présentent la même hauteur effective. Leur jonction en pied et en tête avec d'autres éléments constructifs affecte leur comportement statique.

↑↑ 25

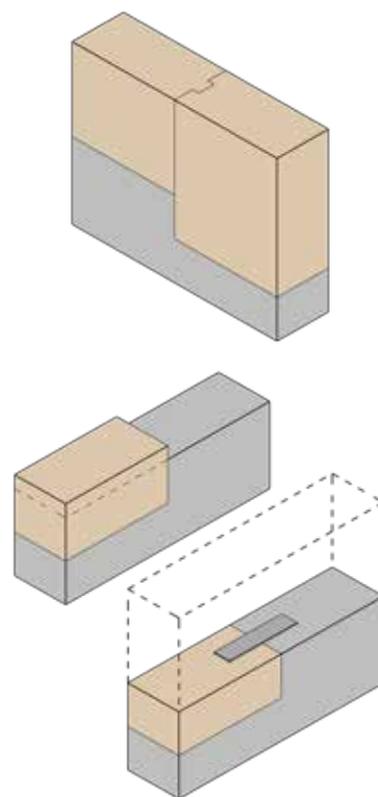
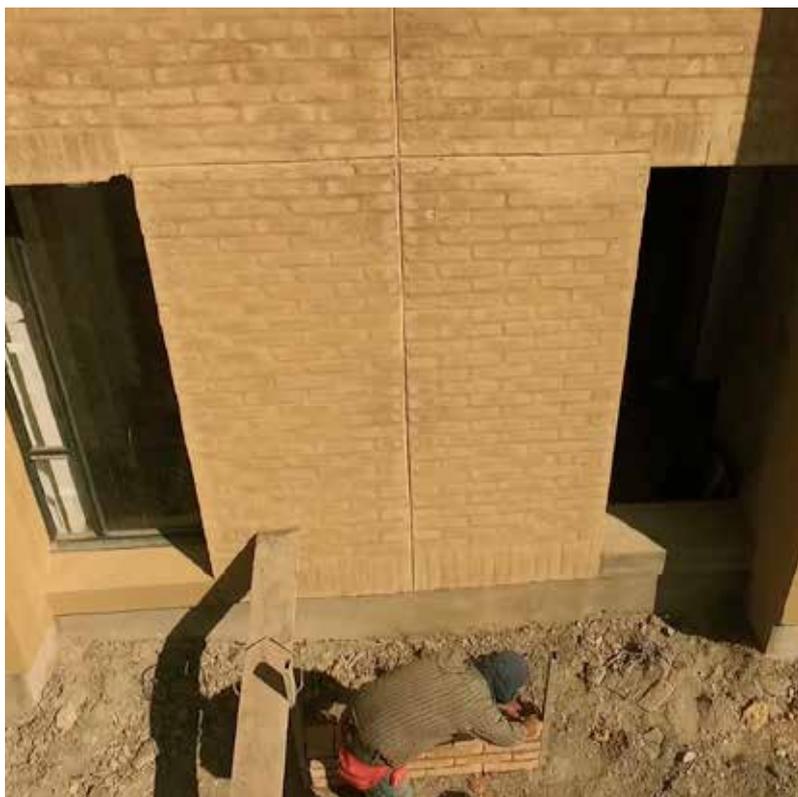
La stabilité des murs et cloisons peut être assurée par le système dans lequel ils s'intègrent.

↑ 26

La stabilité des murs peut également être assurée par leur forme.

Illustrations · CRAterre - A. Misse





seur, refends, contreforts, courbure, fruit, etc. Elle peut également être renforcée ou assurée par le système dans lequel elle est intégrée : chaînages et ossatures, planchers, armatures, etc.

Si les parois de terre crue sont dimensionnées comme les autres structures, les performances mécaniques modestes du matériau doivent être prises en compte dès l'esquisse. Elles demandent notamment de dimensionner et positionner les baies en prenant en considération les concentrations d'efforts qu'elles génèrent sur certaines portions de la structure. C'est également au niveau des nœuds constructifs que l'attention du concepteur doit se porter, comme les liaisons de parois de même nature en T et en L ou l'appui du plancher sur le mur. Les dispositions constructives spécifiques aux baies et nœuds constructifs sont détaillées dans des parties dédiées de ce chapitre.

Le concepteur anticipe également les conséquences des variations dimensionnelles spécifiques aux matériaux en terre crue. La hauteur de la paroi mise en œuvre prend en compte le retrait vertical (ou tassement) qui s'opère lors du séchage, afin d'assurer tout d'abord que la hauteur du mur à terme sera bien la hauteur désirée. Ce retrait est particulièrement important pour les techniques mises en œuvre à l'état plastique, comme la bauge.

Les portions de parois de hauteurs différentes, du fait par exemple d'une hauteur variable de soubassement, doivent être traitées avec attention. Elles sont idéalement désolidarisées de manière à permettre le mouvement vertical différencié de chacune. Le *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue\** indique pour la bauge qu'il est également possible de réa-

\* ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018

← 27

Les murs de cet espace rural de services de proximité, en Auvergne, conçu par Boris Bouchet architectes, présentent des joints verticaux qui permettront les mouvements horizontaux libres des parois.

Photo · Christophe Camus

↖ 28

Ces logements, construits en Colombie en 2015 ont été conçus par Mauricio Sanchez et Juan Pablo Urbina. Des joints réguliers y permettent le libre mouvement des portions de mur lors de leur séchage.

Photo · D. Angulo

↑ 29

Des précautions doivent être prises au moment de la mise en œuvre pour permettre des retraites verticales différencielles au moment du séchage.

Illustrations · amàco · S. Bioul, sur base du *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue* (ARES0, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018)



30 ↑↑

De simples plaques de verre protègent la paroi de terre crue des projections d'eau dans le Centre Oasis à Saint Just Rambert, conçu par Eric Bousser.

Photo · CRAterre – S. Moriset

Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)

31 ↑

Haascookzemmrich Studio 2050 propose un traitement chaleureux des ébrasements de fenêtres du Siège Alnatura à Darmstadt, en Allemagne. La finition en bois protège la paroi en terre à cet endroit particulièrement sollicité.

Photo · Roland Halbe

liser des mises à niveau avec de la bauge et de laisser celle-ci faire son tassement avant de continuer à monter le mur. Dans ce cas, des répartiteurs de charge devront être intégrés au cœur de la levée suivante au-dessus des ruptures du niveau inférieur. Les produits préfabriqués tels les briques et blocs, mis en œuvre secs sur chantier, limitent les risques liés à ce phénomène : seuls les joints font du retrait.

Le retrait horizontal doit également être anticipé. Pour éviter des fissures verticales aléatoires, des joints de retrait (ou de fractionnement) peuvent être réalisés dans l'épaisseur du mur. Ceux-ci sont continus sur toute l'épaisseur de l'ouvrage. Le *Dossier technique lié à l'ATEX de type A n°2588\** préconise une longueur libre maximale entre bords libres, joints de retraits, murs de refends, chaînages verticaux ou contreforts =  $(26 \times (e + 1,5)) + 1,5$  ; où « e » est l'épaisseur du mur. Une paroi de 14 cm d'épaisseur sera donc recoupée tous les 4,04 m et une paroi de 29,5 cm d'épaisseur sera recoupée tous les 8,07 m.

### Appareillage

Les maçonneries doivent répondre aux règles d'appareillage usuelles (notamment la discontinuité des joints verticaux) afin de répartir les charges et éviter les fissurations. Ces principes sont les mêmes pour les techniques de terre banchée (pisé, bauge coffrée, ...) qui peut être abordée comme une maçonnerie en grand appareil. Le dessin du calepinage des différents lits d'éléments permet d'anticiper et de contrôler la faisabilité d'un bon appareillage.

### Finitions intérieures

Les finitions en terre crue sont sensibles aux frottements et aux projections d'eau. La terre peut tout d'abord être grattée volontairement ou heurtée par accident. Dans certains contextes, une protection de surface contre les chocs et frottements doit être envisagée. Par ailleurs, toute paroi susceptible de recevoir des projections d'eau, comme les crédences, parois de douches et abords de lavabos, doit idéalement être protégée.

Une grande variété de solutions existe. Des adjuvants naturels peuvent tout d'abord renforcer l'enduit de finition intérieur. La surface peut par ailleurs être badigeonnée, au moyen d'un stabilisant naturel (par exemple, caséine ou vernis perméable à la vapeur d'eau). Ces traitements de surface protègent la terre des projections d'eau occasionnelles tout en renforçant sa résistance. Ils modifient généralement peu l'aspect de la terre, mais peuvent changer quelque peu sa teinte et lui donner un aspect satiné. Pour en apprendre plus sur le sujet, consultez l'ouvrage *Argiles & biopolymères : les stabilisants naturels pour la construction en terre\*\**.

Une finition apposée, tels les carreaux de céramique, est éga-

\* Misse, Gasnier, Lietar, et al., 2018

\*\* Vissac, Bourgès, Gandreau, Anger, Fontaine, 2017



lement possible. L'artisan doit alors veiller à garantir la bonne accroche des carreaux sur le support. En maçonnerie de petits éléments, l'idéal est de maçonner ou rejointoyer au mortier stabilisé. Celui-ci facilite l'accroche du mortier de pose stabilisé des carreaux. La mise en œuvre d'un parement est finalement envisageable. Celui-ci peut être un simple panneau de verre, un doublage en bois, voire une contre-cloison. Cette dernière solution est la plus sûre pour les parois susceptibles de recevoir des projections d'eau importantes, comme les parois de douche.

### Angles saillants

Les angles saillants des parois et finitions en terre doivent être renforcés ou protégés, surtout dans les lieux exposés, comme les circulations. Pour éviter les épaufures dans les angles saillants, différentes stratégies existent, de retrait, d'intégration ou d'ajout de matière ou matériaux. Les angles peuvent tout d'abord être chanfreinés ou arrondis, selon la préférence formelle. Ils peuvent également être renforcés dans la masse, en stabilisant le matériau à la chaux ou au ciment. Il est aussi possible de maçonner sur l'angle saillant des matériaux durs et stables, comme la brique de terre cuite, la pierre ou le béton de ciment. L'adjonction d'une pièce extérieure est finalement possible, comme une cornière métallique, un profilé en bois ou un poteau.

### Liaisons de parois

Les liaisons de parois verticales de même nature en T et en L sont appareillées selon les règles de l'art, voire armées afin d'éviter des désordres de tassements et retraits différentiels.

↑ 32

Dans ce bâtiment du groupe scolaire Miriam Makeba à Nanterre, l'agence toa architectes associés multiplie les fonctions du mobilier : rangement, assise et protection du mur. Photo · Frédéric Delangle

↓ 33

Les angles saillants des baies du Collège Paiamboue en Nouvelle-Calédonie ont été chanfreinés pour éviter les épaufures. Le projet en pisé stabilisé au liant hydraulique a été conçu par K'aDH (Espaces Libres), André Berthier et Joseph Frassanito Photo · Yann Letenier SCB - C. Malecot





34 ↑↑

Le bâtiment utilisé par amàco aux Grands Ateliers à Villefontaine, conçu et construit par les étudiants du master AE&CC de l'ENSA de Grenoble en 2013, propose l'intégration de réseaux et équipements électriques derrière des cornières qui permettent en outre la protection de l'angle saillant intérieur des trumeaux.

Photo · amàco – R. Anger

35 ↑

Les menuiseries du Centre Oasis, à Saint Just Rambert, accueillent certains équipements électriques, libérant ainsi le mur en pisé de ces contraintes. Le bâtiment a été conçu par Eric Bousser.

Photo · CRAterre – S. Moriset

36 →

*The Great Wall of WA*, en Australie, expose sa plomberie en dehors du mur de pisé stabilisé au liant hydraulique. Le projet revient à Luigi Rosselli Architects

Photo · Luigi Rosselli Architects - Edward Birch

Dans le cas des maçonneries de petits éléments, c'est généralement avant tout le bon appareillage des briques ou blocs qui garantit la liaison des murs par un bon harpage. Les constructions en maçonneries de terre agglomérée, comme le pisé, la bauge et la terre coulée, sont traitées de la même manière, en tant que maçonnerie de grand appareil. Des renforts et chaînages peuvent y être intégrés afin d'assurer une bonne liaison des murs de refends et contreforts, en particulier en zone à risques sismiques élevés.

Les parois verticales de natures différentes sont quant à elles volontairement désolidarisées afin de leur permettre la différenciation de leurs mouvements (retrait, dilatation, tassement, ...). L'assemblage peut être réalisé par une gorge permettant la pénétration d'une paroi dans l'autre tout en garantissant une liberté de comportement différentiel. Si une étanchéité est recherchée, à l'eau, à l'air ou au son, un simple joint de mastic assure la finition. Si une continuité de la finition est souhaitée entre deux parois de différentes natures alignées, un enduit tramé pourra être disposé sur le joint après tassement de la paroi. Le risque d'une fissuration ultérieure n'est cependant pas exclu.

### Intégration des réseaux

Les diverses réservations, trémies et saignées sont réalisées en prenant en considération la résistance limitée du mur en terre. Les normes conventionnelles, pour la pose des circuits électriques par exemple, sont respectées : pas de saignées obliques ni dans le même axe, distances minimales à respecter, ...

Pour éviter les saignées dans les parois destinées à rester apparentes, il existe deux stratégies. Les réseaux peuvent tout d'abord être intégrés aux menuiseries horizontales et/ou verticales (plinthes, encadrements de porte, ...). Les passages et gaines peuvent par ailleurs être anticipés et les réservations au sein du mur effectuées au moment de sa mise en œuvre. Des BTC avec réservations prévues lors de leur fabrication permettent d'intégrer les gaines au mur sans en modifier l'aspect fini.

Si des réseaux sont intégrés à des éléments mis en œuvre par compactage, ils doivent être solidement attachés à une structure afin d'en limiter le mouvement.

Pour limiter les conséquences d'éventuelles fuites du réseau d'eau, le concepteur peut éviter l'intégration de tuyaux aux ouvrages, en choisissant, par exemple, de les placer apparents. Le propriétaire et l'utilisateur doivent par ailleurs être sensibilisés aux risques et au bon entretien des équipements. Leur réactivité en cas de fuites sera déterminante.

### Ancrages et fixations d'équipements

La charge maximale qui peut être reprise par la paroi dépend du type de fixation et de la technique de construction. De manière générale, les fixations non structurelles posent peu de pro-





blèmes. Elles sont réalisées au moyen de vis avec chevilles ou vis à béton suffisamment longues et à bonne distance des arêtes saillantes. A titre d'exemple, le *Dossier technique lié à l'ATEX de type A n°2588\** préconise d'une part une distance de l'arrête saillante supérieure à 15 cm et au double de la profondeur d'ancrage et d'autre part une distance entre fixation supérieure à 20 cm et au quadruple de la profondeur d'ancrage.

Pour les charges plus lourdes, tout dépend de la technique de construction et des performances des matériaux mis en œuvre. Les BTC Cycle terre permettent l'ancrage de masses de plusieurs centaines de kilogrammes. Pour fixer des charges lourdes ou des éléments particulièrement sollicités dans des parois moins résistantes, une pièce d'ancrage est prévue dans l'épaisseur de la paroi. Il s'agit généralement d'une pièce de bois cloutée, d'une platine métallique ou d'un insert en béton placé en montant ou par incrustation. Cette technique est par exemple utilisée pour fixer les plinthes dans une paroi en terre coulée. Selon la même logique, les ancrages dans les parois de terre allégée (<1200 kg /m<sup>3</sup>) s'effectuent dans l'ossature structurelle.

Finalement, les charges les plus importantes peuvent être maintenues au moyen d'un percement traversant avec un répartiteur de charge placé de l'autre côté de la paroi.

37 ↑↑

Les pattes de fixation du parement en pisé du centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen sont vissées dans le mur porteur en pisé. Le bâtiment conçu par nunc architectes a été réalisé par Caracol et l'entreprise J. Gargano.

Photo : CCAB - Y. Meyer

38 ↑

Pour les efforts plus importants, un répartiteur de charge peut être placé, comme dans cette réhabilitation d'une grange en pisé à Vinay.

Photo : Martin Pointet

## Baies

Les points de vigilance associés aux baies (hors phénomènes dus à l'eau, traités au point « fenêtres » dans la partie « façades ») sont principalement de deux types : l'ancrage des menuiseries et les risques de mouvements dus aux concentrations d'efforts et aux variations dimensionnelles du mur lors de son séchage initial. Différentes recommandations permettent de limiter les pathologies au droit des baies.

Il convient tout d'abord de bien dimensionner les pleins et les vides des façades. Le bâti traditionnel en terre crue présente généralement des baies alignées horizontalement et verticalement. Les *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre\*\** donnent quelques valeurs indicatives de dimensionnement pour les façades en terre crue ainsi percées de baies rectangulaires, toutes techniques confondues. Tout d'abord, la surface cumulée des baies d'une façade doit être inférieure au tiers de la surface pleine de mur. La longueur cumulée des ouvertures doit par ailleurs rester inférieure au tiers de la longueur du mur. Les trumeaux ont une largeur minimale de 65 centimètres pour les murs non-porteurs et de 1 mètre pour les porteurs. Ils sont également toujours plus larges que l'épaisseur du mur. Et finalement, les percements sont éloignés des angles, placés à plus d'1 mètre de l'about. Nous verrons plus loin que la typologie des murs-trumeaux permet de s'affranchir de ces règles spécifiques aux percements traditionnels édictées dans cet ouvrage.

\* Misse, Gasnier, Lietar, et al., 2018

\*\* Houben, Schneegans, CRAterre, et al., 1982



Outre le bon dimensionnement des pleins et des vides, une bonne transmission et répartition des charges au niveau du linteau et de l'allège permettent de limiter les pathologies. On trouve dans l'architecture vernaculaire des baies sans linteau de portée inférieure à 60 cm pour la bauge et à 40 cm pour le pisé. Pour des portées plus grandes, un arc ou un linteau est prévu. Si les arcs peuvent être réalisés en terre crue, généralement à l'aide de briques, un autre matériau est préféré pour le linteau qui doit bien reprendre les efforts de flexion (bois, métal, pierre naturelle, béton de ciment armé). Augmenter sa longueur d'appui de part et d'autre de la baie permet de répartir au mieux les efforts et de limiter les tassements différentiels.

Un détail architectural spécifique pourra être pensé au niveau du linteau et de l'allège pour anticiper le risque de fissures dues aux tassements différentiels mais aussi au retrait de séchage du mur. La réalisation de joints de mouvements verticaux dès la mise en œuvre permet de diriger la fissuration. Ceux-ci, pour être efficaces, doivent traverser toute l'épaisseur de la paroi. L'allège ou le linteau peut être placée en retrait de manière à masquer le joint ou la fissuration dans un angle rentrant. Cette contrainte devient l'opportunité d'un détail à dessiner.

Avec l'évolution des performances des matériaux et de nos manières d'habiter, les parois massives percées de petites ouvertures ont laissé place à des superstructures plus légères. La typologie du mur-trumeau permet d'agrandir les ouvertures limitées dans la conception traditionnelle du mur percé et d'apporter ainsi plus de lumière naturelle dans un bâtiment à l'esthé-

↑ 39

Les façades en pisé de ce poste de transformation électrique situé à Villeurbanne, en France, proposent un nouveau langage chaleureux sur ce site industriel. L'ouvrage a été conçu par Tectoniques architectes. Les joints judicieusement placés dans le prolongement des piedsroits permettent de diriger les éventuelles fissures de retrait ou tassement différentiels.

Photo · Tectoniques architectes /  
Renaud Araud photographe



Les murs-trumeaux permettent de s'affranchir des règles de dimensionnement des baies.

40 ↑↑

Le chai viticole du Domaine de Trevallon dans les Bouches-du-Rhône, conçu en 2013 par BOSC architectes.  
Photo · BOSC architectes

41 ↑

L'imprimerie Gugler, à Pielach, en Autriche, conçue en 1998 par Ablinger, Vedral&Partner.

Photo · Dominique Gauzin-Müller

42 ↗

Le siège Alnatura, à Darmstadt, en Allemagne, conçu en 2019 par haascookzemmrich Studio 2050.  
Photo · Roland Halbe

43 →

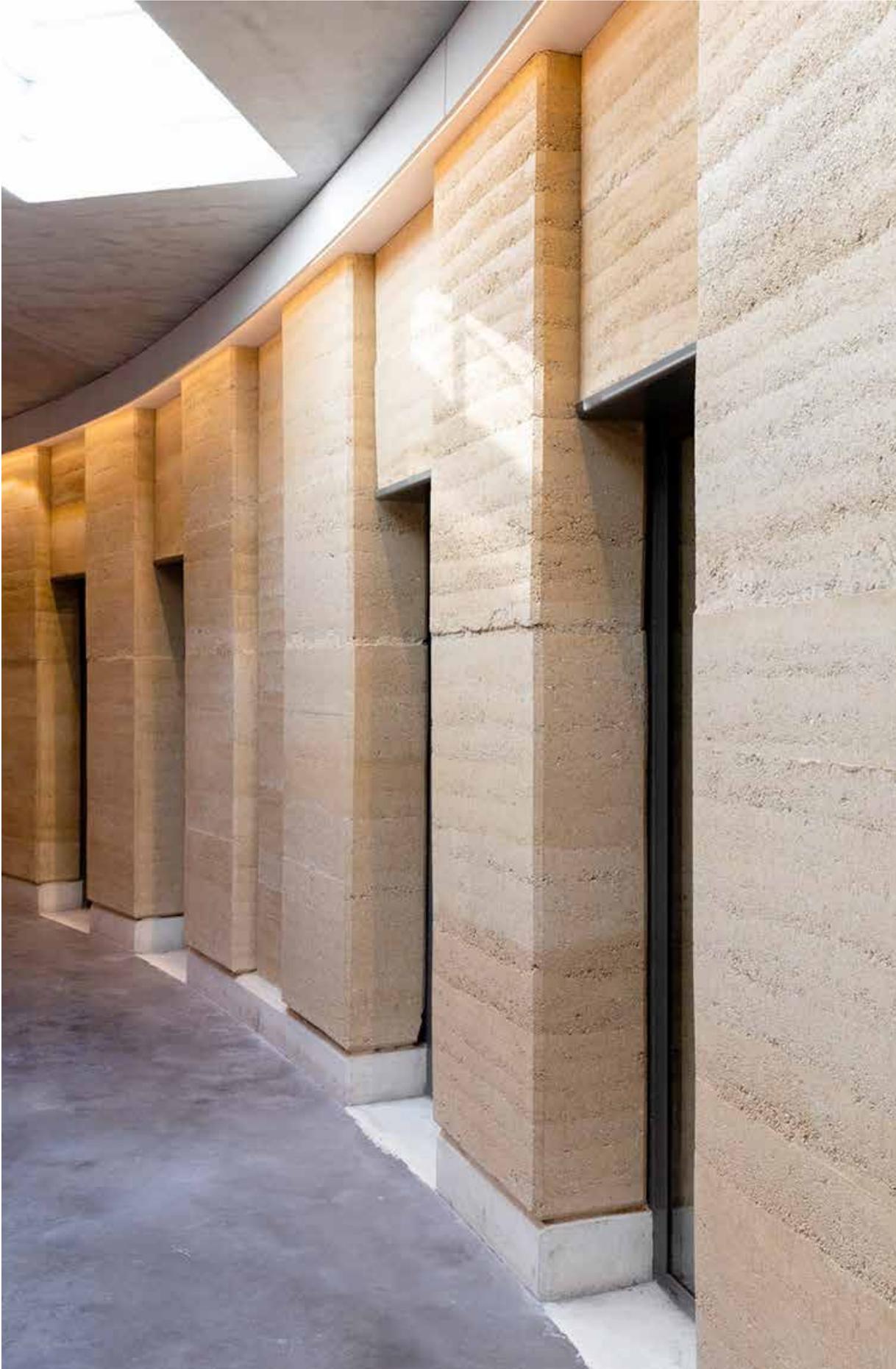
Le linteau en retrait gère avec élégance le joint de mouvement dans cette Maison de champagne, à Crouettes-sur-Marne, conçue par Thierry Bonne accompagné par Wilfredo Carazas pour son expertise terre crue.  
Photo · Philippe Dureuil

tique plus contemporaine. Les baies toute hauteur solutionnent par ailleurs le problème des fissures aux angles des baies. Ces murs-trumeaux peuvent être auto-stables, prenant des formes de L, U, T,H, ou stabilisés au moyen de chaînages.

Les piédroits qui doivent reprendre des charges plus importantes que le mur courant sont généralement renforcés à l'aide de matériaux plus résistants ou stabilisés. Cette stratégie permet par ailleurs d'ancrer aisément les menuiseries au mur. Il est ainsi courant de trouver des jambages en bois, en briques cuites, en pierre ou en béton de ciment armé. Le *Traité de construction en terre\** préconise de harper les jambages maçonnés aux murs. La différence de dureté et de variations dimensionnelles (notamment lors du séchage) peut cependant générer des fissures et une érosion différentielle. C'est pourquoi certains praticiens conseillent plutôt d'éviter l'harpage de matériaux différents, lui préférant une juxtaposition ou un empilement net.

Si les piédroits ne nécessitent pas de renforcement d'un point de vue structurel, pour des portées réduites par exemple, d'autres options d'ancrage des menuiseries sont possibles. Tout d'abord, des pré-cadres peuvent être mis en place avant la réalisation de la maçonnerie avec des pattes d'ancrage noyées en montant dans les joints. Un pré-cadre rigide dans un mur en terre peut cependant provoquer des fissures obliques partant des angles. Pour les éviter, outre les joints de mouvement déjà évoqués au niveau du linteau, il convient de prévoir un espace entre le cadre et le linteau pour permettre au mur de réaliser son retrait vertical.

\* Guillaud, Houben, Dethier, CRAterre, 2006





↑ ↗ 44 -45

46 ↓

Les joints anticipant les fissurations possibles sont repris dans le calepinage des éléments préfabriqués en pisé. Le centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen, conçu par nunc architectes, a été réalisé par Caracol et l'entreprise J.Gargano.

Photo · Luc Boegly

Les piédroits des baies de l'atelier d'architecture ALP, conçu par celui-ci, sont réalisés en sections de bois pleines, une mise en oeuvre typique de la bauge.

Photo · S. Bioul





Le *Manuel de construction : La maçonnerie en terre crue\** conseille de prévoir un espace de 5 mm au-dessus d'une baie de porte dans un mur en BTC.

Une autre option, entre autres pour ancrer des menuiseries plus sollicitées, est d'intégrer des pièces d'ancrage au mur. Celles-ci sont couramment réalisées en bois ou en béton de ciment. Pour les parois maçonnées en BTC, les blocs en U permettent de sceller les ancrages dans le béton de ciment tout en conservant la continuité du rendu en façade. Ces réservations peuvent être bétonnées en montant si les cadres sont déjà placés, ou une fois la maçonnerie terminée dans le cas contraire. Elles sont alors comblées de sable mouillé lors du montage de la maçonnerie. Une des deux ailes latérales du bloc U est ensuite délicatement cassée et le sable ôté. Les pattes de scellement peuvent finalement être placées avec la menuiserie et bétonnées. Il est important d'anticiper le placement de ces pièces d'ancrage, surtout si la maçonnerie est destinée à rester apparente. La démolition nécessaire à l'intégration d'éléments d'ancrage après mise en œuvre du mur laisserait des reprises inesthétiques.

↑ 47-48

Des pièces d'ancrage pour les menuiseries en bois, du même format que les briques, ont été placées dans les piedroits de baies de cette maison régionale à Edegem, en Belgique. Le bâtiment a été conçu par BC architects & studios, les BTC produites par BC materials et la mise en œuvre prise en charge par l'entreprise het Leemiscaat.

Photos · S. Bioul

→ 49

Les façades du centre de visite de la Station ornithologique suisse situé sur les rives du lac de Sempach montrent des baies alignées horizontalement et verticalement et à distance des angles. On peut par ailleurs y observer un soubassement et un traitement des abords efficaces. Le bâtiment, conçu par :mlzd a été réalisé par Lehm Ton Erde Schweiz GmbH.

Photo · © Alexander Jaquemet

\* CRAterre - ENSAG, 2014



BESUCHSZENTRUM





vogelwarte.ch



50 ↑

## Façades

Le traitement des abords et du soubassement de ce pavillon de production viticole artisanale, conçu par Patricio Merino Mella, évitent une humidification prolongée des pieds de façades.

La toiture débordante protège également les murs de la pluie. Ce pavillon a été édifié à Cauquenes, au Chili, en 2012.

Photo · Patricio Merino Mella

### Abords

La mise en œuvre courante aujourd'hui d'un soubassement et d'une barrière capillaire permet d'écarter les risques principaux de remontées capillaires. Le traitement adéquat des abords, capital pour les constructions vernaculaires, mérite tout de même d'être évoqué ici.

Pour éviter la stagnation d'eau ou un sol longuement détrempé aux abords de la construction, ceux-ci sont tout d'abord efficacement drainés, dans le respect des règles de l'art et notamment du NF DTU 20.1.\* Toute stagnation d'eau en pied de mur en terre doit être évitée, même temporairement sur la durée de travaux.

L'idéal est ensuite d'éviter les revêtements étanches, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des constructions. Ceux-ci ne laissent d'autre chemin d'évacuation à l'eau présente dans le sol par percolation que le mur lui-même. La présence d'une barrière capillaire limite cependant ce risque.

Les éléments susceptibles d'apporter de l'humidité au mur et de l'empêcher de sécher sont consciencieusement écartés. Il s'agit d'une part des objets posés contre les murs – tas de sable, stock de matériaux, ... – mais aussi de la végétation. Cette dernière met en place un cercle vicieux, apportant au mur l'humidité dont elle a besoin pour grandir. Ses racines peuvent également fragiliser l'ouvrage. On évitera donc la disposition de parterres plantés et bacs de plantes le long des murs (qu'il faudrait, de plus, arroser !) tout comme la végétation spontanée.



## Soubassement

Au niveau du pied de l'ouvrage, deux stratégies existent : la masse d'usure et le soubassement stable. La première consiste à surdimensionner la base du mur en lui adjoignant une « masse » supplémentaire. Celle-ci n'étant pas nécessaire à la stabilité de l'ouvrage, elle peut être fragilisée par l'eau et l'érosion mécanique sans le mettre en péril. Cette stratégie est répandue dans le monde mais reste peu utilisée en France aujourd'hui, même si on peut en imaginer des interprétations contemporaines intéressantes.

La deuxième stratégie, préférée en situation urbaine, consiste en une barrière capillaire horizontale et un soubassement suffisamment haut, résistant aux chocs et à l'eau. La maçonnerie de briques cuites, de pierres naturelles ou de blocs de béton de ciment ainsi que le béton de ciment banché sont des techniques adaptées à la mise en œuvre en soubassement. La barrière capillaire est réalisée telle que définie dans le NF DTU 20.1.\* : feuille bitumineuse armée, feuille plastique ou élastomère, chape de mortier hydrofugé de ciment, ...

L'articulation entre le soubassement et le mur en terre est un point de vigilance particulier. Il faut y éviter la stagnation ou l'action de l'eau par un détail approprié ou stabiliser les premiers lits de terre pour les renforcer.

La hauteur du soubassement respecte à minima les prescriptions du NF DTU 20.1.\* et est généralement revue à la hausse, en fonction de l'exposition et du climat. Elle est souvent définie

\* CSTB, 1985

↑ 51

L'atelier d'architecture ALP a conçu, pour ses propres bureaux, un bâtiment dont le traitement des abords et du soubassement sont exemplaires.

Photo · Pierre-Yves Brunaud



↑ 52-53

Le soubassement de l'école de Veyrins-Thuellin, en Isère, conçue par Design & Architecture associés à Vincent Rigassi, combine deux stratégies : le talon en béton est surhaussé de plusieurs lits de terre stabilisée. Le pisé a été réalisé en 2009 par Heliopsis.

Photos · Design & Architecture

54 ↓

L'école primaire de Maosi, en Chine, conçue par Edward Ng et Mu Jun, présente des soubassements en pierre naturelle.

Photo · Mu Jun





à 20 centimètres minimum, comme dans le *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2588\** réalisé pour la mise en œuvre de BTC à Mayotte.

En toute logique, la hauteur du soubassement peut être pensée en relation à la pluviométrie du lieu et à l'ampleur du débord de toiture. Les *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre\*\** préconisent ainsi un soubassement allant de 25 à 55 centimètres en fonction de ces deux paramètres.

Pour protéger le soubassement du rejaillissement, une stratégie de protection par parement ventilé est également possible.

#### Système constructif de façade, finition extérieure et dispositifs de protection

La terre crue en façade peut être intégrée à différents niveaux des enveloppes successives pour différentes fonctions : finition intérieure, mur porteur, remplissage d'ossature, parement, finition extérieure. Le système constructif et la finition de façade doivent être choisis stratégiquement selon plusieurs facteurs tels que l'orientation de la paroi, le climat, l'utilisation des locaux ou les dispositifs de protection.

La norme française NF DTU 20.1.\*\*\* sur les ouvrages en maçonnerie de petits éléments oriente le choix du type de mur de façade selon son exposition à la pluie et au vent. Ces prescriptions générales restent pertinentes pour les maçonneries de terre. Tout en appliquant les recommandations usuelles, le concep-

\* Misse, Gasnier, Lietar, et al., 2018

\*\* Houben, Schneegans, CRAterre, et al., 1982

\*\*\* CSTB, 1985

↑ 55

Le soubassement peut faire l'objet d'une intention architecturale à part entière et devenir le lieu d'activités spécifiques. Ce bâtiment comprenant des logements et un hall communautaire à Sunderpur, en Inde, a été conçu par les étudiants de Base Habitat, Kunst Universität Linz : S. Vilanek, I. Nöbauer et F. Ganzer.

Photo · Kurt Hörbst

↓ 56

Au Japon, la base du mur de cette maison traditionnelle est protégée des projections d'eau de la route par un bardage amovible.

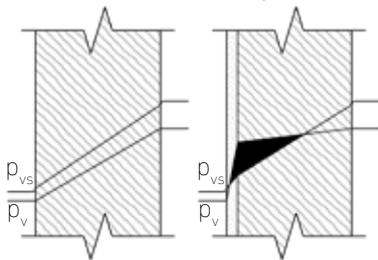
Photo · S. Bioul



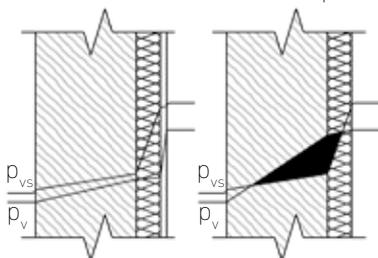
Dans les graphiques selon la méthode de Glaser, un risque de condensation interne par diffusion de vapeur d'eau est identifié lorsque la courbe de pression de vapeur d'eau ( $p_v$ ) passe au-dessus de la courbe de tension de saturation ( $p_{vs}$ ). La pression de vapeur dans l'air ne pouvant pas être supérieure à la pression de saturation, il y a en théorie, à cet endroit, condensation.

Les schémas ci-dessous montrent quelques cas de figure qui peuvent se présenter en hiver. La zone de risque de condensation y est représentée en noir.

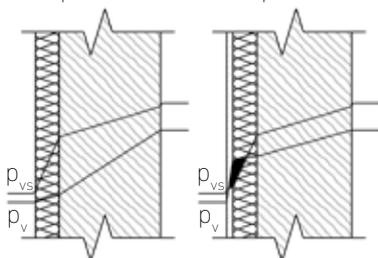
Mur non-isolé, sans ou avec finition extérieure peu perméable à la vapeur d'eau.



Mur isolé par l'intérieur, avec ou sans finition intérieure peu perméable à la vapeur d'eau (frein vapeur).



Mur isolé par l'extérieur, sans ou avec finition extérieure peu perméable à la vapeur d'eau.



57 ↑

Illustrations · amàco · S. Bioul

teur garde à l'esprit la sensibilité particulière de la terre à l'eau, qu'elle vienne d'en bas (eau stagnante et remontées capillaires), de l'intérieur (condensation) ou de l'extérieur (pluie battante).

Les remontées capillaires et la condensation interne sont évitées simplement et de la même manière qu'avec d'autres matériaux. Nous avons vu que le traitement des abords et la présence d'un soubassement et d'une rupture de capillarité permettent aujourd'hui d'éviter les remontées capillaires.

Pour éviter la condensation interne par transport de vapeur d'eau par convection, le concepteur veille à une étanchéité à l'air suffisante de la finition intérieure et de tous les nœuds constructifs tels que les joints de la menuiserie à la maçonnerie. Nous avons vu que la terre crue est étanche à l'air. Un enduit intérieur en terre crue peut donc exécuter cette étanchéité. Le test d'étanchéité à l'air permet de contrôler l'atteinte des objectifs sur chantier.

Pour éviter la condensation interne par diffusion de vapeur d'eau, le concepteur étudie et adapte la composition des parois périphériques du bâtiment. Il existe des outils de vérification (qui sont aussi de bonnes aides à la conception) statiques, comme la méthode de Glaser, ou dynamiques (généralement payants). Globalement, lorsqu'on étudie les constituants de la paroi de l'intérieur vers l'extérieur, leur perméabilité à la vapeur d'eau doit augmenter et leur conductivité thermique doit diminuer afin de minimiser les risques de condensation interne d'hiver. Cela implique trois conséquences pratiques principales. Tout d'abord, l'isolation des murs par l'intérieur est défavorable. Le concepteur lui préfère une isolation par l'extérieure perspirante. Ensuite, toute finition extérieure étanche à la vapeur d'eau et non ventilée est à proscrire. Elle aura non seulement tendance à se décoller du support, mais elle pourrait surtout engendrer une accumulation d'humidité dans le mur néfaste pour sa stabilité. Et finalement, une finition intérieure freinant la vapeur d'eau doit être favorisée. Nous avons vu que la terre crue est perméable à la vapeur d'eau. Elle peut cependant constituer un frein-vapeur suffisant à partir d'une certaine épaisseur dans de nombreuses compositions de parois, au même titre que le plâtre. Les argiles gonflant avec l'humidité, l'enduit terre est d'autant plus étanche à la vapeur d'eau que l'humidité relative de l'air est élevée. Son comportement s'adapte donc efficacement selon le besoin, tout en permettant un stockage de l'humidité pour une restitution ultérieure à l'ambiance intérieure. Notons qu'afin d'éviter la condensation interne d'été l'application d'un pare-vapeur intérieur est proscrite au profit d'une membrane « intelligente » ou d'un enduit régulateur qui garantissent tous deux le potentiel de séchage du mur. L'enduit terre intérieur peut donc bien répondre aux contraintes d'hiver comme d'été.

Rappelons pour terminer que toutes ces règles destinées à éviter la condensation interne ne sont pas spécifiques aux parois de terre crue. En fait, l'exceptionnelle capacité d'échanges hy-



gométriques de la terre crue lui permet de limiter les pics d'humidité relative dans le logement. Elle limite ainsi fortement les risques de condensation de surface et interne.

Ces quelques règles de l'art habituelles permettent d'éviter l'humidification du mur par capillarité ou par condensation. Nul n'est cependant jamais à l'abri d'une malfaçon ou d'un accident. Par sécurité, et d'autant plus si des risques de présence d'humidité dans le mur sont connus, les isolants et finitions perspirants sont toujours privilégiés, de manière à permettre aux échanges d'humidité de s'effectuer librement.

Garantir la durabilité d'une paroi en terre crue exposée à l'ambiance extérieure nécessite davantage de précautions. Nous avons vu tout d'abord qu'une finition étanche à la vapeur d'eau et non ventilée, qui semble renforcer la durabilité de la paroi aux intempéries, peut au contraire générer ou accentuer les remontées capillaires et la condensation. A cette approche contreproductive visant à renforcer la résistance à l'eau du matériau, le concepteur préférera une solution architecturale et contextuelle de protection de l'élément constructif.

Chaque paroi doit tout d'abord être étudiée en regard de son orientation et du climat (vent, pluviométrie, rayonnement solaire, température, etc.). Une réponse architecturale en climat relativement sec présentant des vents violents du nord ne saurait être similaire à la stratégie adoptée en région pluvieuse et peu venteuse. Si la pluviométrie y est relativement faible par rapport aux autres régions de France, les *Règles professionnelles*

↑ 58

Les toitures des bâtiments dont les façades sont en terre crue peuvent leur donner une identité forte. C'est le parti qu'ont choisi Wang Shu et Lu Wenyu d'Amateur Architecture Studio pour le bâtiment *Wa Shan*, à Zhuangtang, en Chine.

Photo · © Edward Denison



59 ↑↑

Le Terra Nostra, un prototype de logement collectif conçu et construit par la Team Auvergne-Rhône-Alpes de l'ENSAG/ENSAL/GAIA, présente une toiture débordante originale et contemporaine.

Photo · ENSAG/ENSAL/GAIA

60 ↑

Les coursives de la résidence Salvatierra à Rennes abritent de la pluie les façades en terre crue qu'elles surplombent. L'architecte Jean-Yves Barrier a conçu cet immeuble construit en 2003.

Photo · Marc Jeanaud

—  
Diverses stratégies existent pour abriter les façades en terre crue des intempéries. Toutes offrent l'opportunité d'un parti architectural fort.

de construction en paille\* donnent pour l'Île-de-France une durée de mouillage de façade allant de 5 à 10 jours par an, avec un impact plus marqué sur l'orientation Sud-Ouest. Ces données se fondent sur la direction et vitesse du vent, la température de l'air, la quantité de pluie reçue par la paroi selon son orientation et l'humidité relative de l'air. Le calcul prend ainsi en compte la pluie battante reçue, le pouvoir asséchant de l'air et le séchage de la façade après chaque épisode pluvieux. Dans ces circonstances, le même ouvrage conseille la mise en place d'enduits à la chaux ou de parements ventilés en finition de façade en paille, en écartant les finitions en terre. En fait, les *Règles professionnelles de construction en paille\**, ne recommandent une finition en terre crue qu'en cas de façade « complètement protégée des intempéries ».

Le concepteur prudent limite ainsi la mise en œuvre de terre crue en finition extérieure aux parois abritées au sens du NF DTU 20.1.\*\* Le caractère abrité de la paroi y est évalué en fonction de sa hauteur au-dessus du sol, de son orientation par rapport à la direction des vents de pluie et des écrans qui la préservent du vent tels que l'environnement bâti, la topographie, les coursives et les garde-corps. Pour une bonne application de ces règles en Île-de-France, notons que les vents dominants y viennent du Sud-Ouest. Il convient cependant d'être attentif aux microclimats générés entre autres par le bâti, la topographie et la végétation. L'effet Venturi peut par exemple totalement modifier la rose des vents localement, et exposer des façades de manière inattendue. L'observation du bâti existant et notamment des traces de lavage, des salissures, des phénomènes d'érosion et de vieillissement en façade, donne des indices qui peuvent guider le concepteur sur le bon choix d'orientation.

En Île-de-France, la stratégie à privilégier pour proposer une finition extérieure en terre crue, outre le choix judicieux de sa hauteur et de son orientation, sera donc architecturale : des écrans aux vents et à la pluie. Ceux-ci peuvent être de diverses natures. Un bâtiment peut tout d'abord en protéger un autre. Cette stratégie est observée dans l'habitat traditionnel qui se protège des vents au moyen d'une annexe ou d'une grange en avancée. Dans une moindre mesure, des retraits et avancées de portions de façades peuvent également protéger des pans de paroi.

On retrouve également dans l'architecture traditionnelle le recours au large débord de toit. Les coursives et garde-corps endossent aujourd'hui le même rôle. En situation générale, la hauteur de paroi doit être inférieure au double de la profondeur de l'abri (soit la largeur du débord de toit ou de la coursive). La perméabilité des garde-corps doit également être prise en compte. Poussée à l'extrême, cette stratégie mène au recours à la double-peau, minérale ou végétale, qu'elle soit perméable à l'eau et à l'air, comme un bardage ajouré, ou totalement étanche, comme un mur-rideau.

\* Floissac, Garcia, RFCP, 2018

\*\* CSTB, 1985



↑ 61

La toiture du *Village d'enfants* à Formoso Do Araguaia au Brésil est mémorable. Elle abrite les façades de briques crues de ce projet conçu par Rosenbaum et Aleph Zero.

Photo · C. Palma

62 ↓

Ces 66 logements à énergie positive construits en 2012 à Lyon, Zac Confluence, proposent une stratégie de protection de façades axée sur les coursives et la double peau. La maîtrise d'œuvre de ce projet revient à © Lipsky+Rollet Architectes.

Photo · © Lipsky-Rollet architectes - Paul Raftery





63 ↑  
Ce centre sportif à Rennes, conçu par l'agence Maurer & Gilbert Architectes, profite des qualités hygrothermiques de la bauge en proposant un mur Trombe totalement protégé des intempéries.

Photo · Michel Denancé

La créativité de l'architecte peut ici entièrement s'exprimer. On comprend, au vu des solutions constructives envisagées, l'importance de la prise en compte des spécificités des matériaux en terre crue dès l'esquisse. Celles-ci peuvent également être prises en compte dans la planification de chantier : les éléments de façade devant également être protégés durant cette période, une stratégie parmi d'autres consiste à construire la couverture avant les façades. Ainsi les matériaux en terre crue peuvent être mis en œuvre à couvert.

Si la prudence plaide pour l'utilisation de la terre crue en finition de façade uniquement sur ces parois *abritées*, de nombreux exemples patrimoniaux et contemporains montrent qu'une exposition plus franche aux intempéries est possible. Rappelons que les façades en terre crue ne se transforment pas en boue et ne fondent pas sous l'effet de la pluie. Dans le cas d'une mise en œuvre sans débord de toit et avec simple protection en tête de mur (couvertine ou chaperon), le concepteur veille à la réalisation parfaite des détails, et en particulier à l'étanchéité des jonctions entre éléments de protection.

Quelques points d'attention complémentaires permettent de favoriser la durabilité de la paroi destinée à recevoir de l'eau de pluie. Gardons à l'esprit qu'une paroi abritée au sens du NF DTU 20.1.\* n'est pas nécessairement totalement protégée des intempéries.

Nous avons tout d'abord vu que les matériaux à base de terre crue sont gélifs et que leur résistance mécanique baisse au-delà d'une certaine quantité d'eau de constitution. Bien que l'Île-

\* CSTB, 1985



de-France soit une zone à risque de gel faible à modéré, ces caractéristiques nous incitent à prendre quelques précautions. Le système constructif choisi doit garantir la protection ou le séchage rapide du mur ou parement. L'isolation par l'intérieur d'une paroi exposée, ralentissant le séchage du mur en terre, n'est pas idéale. Ainsi, le système constructif le plus sûr pour intégrer de la terre crue en parement est de ventiler ce dernier par une lame d'air à la base de laquelle des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux sont prévus (murs de type III et murs doubles). Dans le cas des murs doubles, le NF DTU 20.1.\*\* précise qu'une lame d'air d'au moins 2 cm doit être ménagée entre le parement et l'isolation.

Ensuite, pour éviter les phénomènes d'érosion différentielle, la façade est idéalement composée de matériaux aux caractéristiques similaires. Par exemple, les joints de maçonnerie ont la même résistance que les briques. Si les inclusions de matériaux plus durs ou moins perméables sont possibles, elles peuvent être sources de pathologies et doivent donc être étudiées avec soin.

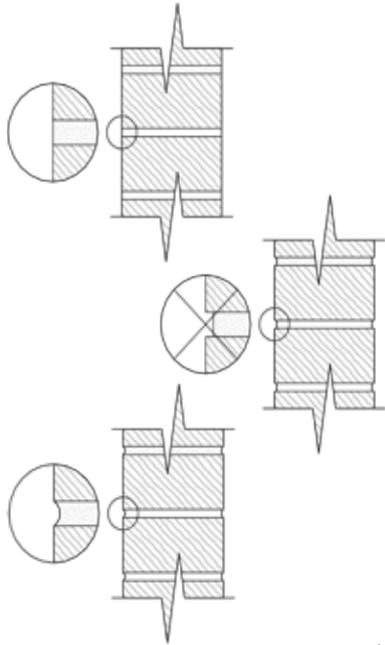
↑ 64

Si l'exposition de terre crue aux intempéries est souvent déconseillée, de nombreux exemples montrent cependant qu'elle n'est pas impossible. Elle nécessite cependant de prendre des précautions de conception et de mise en oeuvre complémentaires.

Ces logements en Colombie, conçus par Dario Angulo Architecte, présentent des façades en briques crues chapeautées par une couverture métallique.

Photo · CRAterre-ENSAG

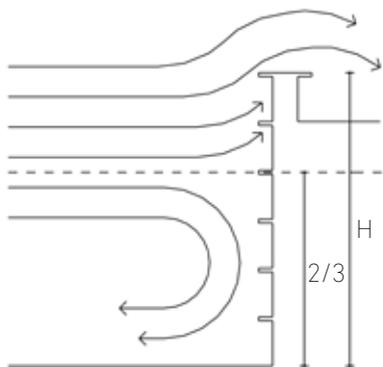
\*\* CSTB, 1985



65 ↑

Les joints de maçonneries en terre crue, de même caractéristiques que les éléments maçonnés, sont finis en demi-rond ou au nu des blocs. Une finition en retrait est déconseillée.

Illustration · amàco - S.Bioul, sur base du *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2588* (Misse, Gasnier, Lietar, et al., 2018)



66 ↑

Le vent peut rabattre la pluie du bas vers le haut sur le tiers supérieur de la façade. Les portions de façade sous des éléments en saillie peuvent être stabilisés de manière à résister à ces sollicitations accrues.

Illustration · amàco - S.Bioul, sur base du rapport de M. R. M. Herbert (Herbert, 1974)

La finition des joints de maçonnerie de petit appareil peut être réalisée de diverses façons, par exemple en demi-rond ou au nu des blocs. Les joints en retrait sont à éviter car ils forment une zone de stagnation d'eau sur le dessus du bloc et favorisent la dilatation différentielle de la face de la brique.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les éléments en saillie ne permettent pas toujours d'abriter la portion de façade qu'ils surplombent. En effet, dans le tiers supérieur du mur, le vent peut rabattre la pluie du bas vers le haut. Les recherches de M.R.M. Herbert\* montrent même que certains éléments en saillie peuvent provoquer une augmentation de l'eau de pluie reçue sous l'élément. Cela concerne les débords de faible profondeur (jusqu'à 40 cm) dans le tiers supérieur du mur. Dans le cadre des essais réalisés, plus le débord est faible, plus la quantité d'eau reçue est élevée. Si ces éléments en saillie ne peuvent être évités, pour un appui de fenêtre par exemple, un matériau stabilisé sera idéalement placé sous le surplomb, de manière à résister aux sollicitations accrues des intempéries.

On retiendra finalement l'importance de l'entretien et de l'attention régulière à porter aux finitions en terre crue exposées aux intempéries. Les phénomènes les plus graves adviennent le plus souvent lorsque la pluie battante agit sur une pathologie pré-existante. Les fissures et éclats sont donc traités de manière à ne pas permettre la stagnation et l'infiltration de l'eau de pluie. Les zones d'érosion ponctuelle sont par ailleurs des témoins d'un ruissellement concentré à traiter rapidement.

## Fenêtres

Les baies réalisées dans les murs de façade peuvent être soumises à divers phénomènes liés à la présence d'eau, qu'elle soit de pluie ou de condensation. Les considérations suivantes développent en majorité des points d'attention courants qui ne sont pas spécifiques aux matériaux en terre crue.

Nous avons vu que la présence de terre dans le bâtiment limite les risques de condensation en régulant l'humidité de l'air. Cela ne dispense cependant pas le concepteur de prendre toutes les précautions d'usages pour les limiter. Les ponts thermiques qui pourraient générer des phénomènes de condensation de surface sont évités et l'étanchéité à l'air des jonctions entre matériaux et éléments permet d'éviter la condensation interne par convection. Ces considérations sont courantes et non spécifiques aux matériaux de terre crue.

Les fenêtres exposées aux intempéries peuvent par ailleurs générer des pathologies liées à l'eau de pluie. Celle-ci peut s'infiltrer à la jonction des différents éléments, stagner sur les surfaces planes et ruisseler sur la face extérieure du mur. La mise en place de stratégies pertinentes et la bonne conception des détails architecturaux permettent de limiter les phénomènes associés à ces facteurs de dégradation.

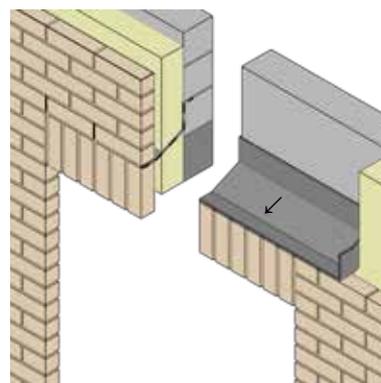
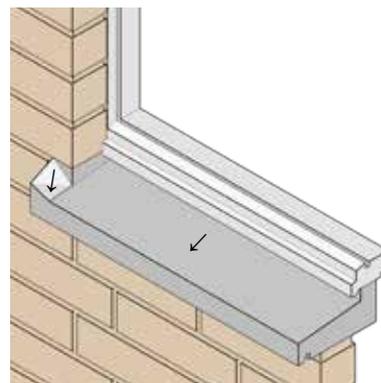
\* Herbert, 1974

Il convient tout d'abord d'étudier l'exposition des différentes façades à la pluie et aux vents. Une conception judicieuse du bâtiment prend ces facteurs en considération pour le choix de l'implantation et de la forme des baies, mais aussi des éventuels dispositifs de protection. Des baies sur une façade très exposée aux intempéries peuvent être à l'origine de phénomènes d'érosion disgracieux, voire structurels, malgré des détails bien pensés. Les stratégies doivent, dans ces circonstances, être plus globales, en intégrant des dispositifs de protection indépendants de la fenêtre tels débords de toit, coursives, double-peau, végétation dense, ...

En ce qui concerne la conception des détails de fenêtres à proprement parler, les appuis, tout d'abord, sont conçus dans les règles de l'art, de manière à éviter toute stagnation d'eau et surtout toute concentration d'écoulement sur le mur. Ces règles, bien connues et mises en application il y a quelques décennies, sont souvent négligées aujourd'hui au profit de solution plus simples et économiques. Sur d'autres maçonneries, les pathologies générées par un appui de fenêtre mal conçu se limiteront à des salissures disgracieuses ou au développement de mousses. Sur le mur en terre, ces concentrations d'eau provoqueront une érosion, défaut esthétique d'abord mais pouvant mener en cas de prolongation à des pathologies plus graves, comme le déchaussement de l'appui.

Ainsi, l'appui doit tout d'abord accuser une pente pour garantir l'évacuation de l'eau, d'au moins 10% selon le NF DTU 20.1.\* Une goutte d'eau, ou *casse-goutte*, évite l'écoulement sous l'appui et jusqu'au mur. Elle est réalisée selon les règles de l'art, notamment décrites dans la même norme. L'appui dispose enfin d'un rejingot, d'une oreille d'appui et d'une jouée, ou, pour les appuis métalliques, d'un dispositif équivalent, comme une remontée latérale similaire à un solin et contre-solin, de manière à éviter l'écoulement sur les abouts de l'appui.

Le concepteur est particulièrement attentif au cas particulier des façades exposées aux vents sur lesquelles l'écoulement d'eau rejetée de l'appui peut être rabattu. Deux stratégies permettent de limiter le phénomène : la répartition du flot ou l'affaiblissement du vent. Tout d'abord, dans le cas d'un ensemble de baies alignées sur un niveau, le bandeau est préféré aux appuis de fenêtre ponctuels pour sa capacité à mieux répartir l'écoulement sur toute la longueur de la façade. En effet, en cas de vent oblique, il y a un risque d'accumulation d'eau ou de flot important à l'about de chaque appui de fenêtre. Ensuite, des écrans peuvent être mis en place pour casser la force du vent ou limiter la pluie tels des coursives, bardages et garde-corps ou végétation.



↑↑ 67

L'appui de fenêtre doit être réalisé dans les règles de l'art, et notamment comporter une pente suffisante, une goutte d'eau, un rejingot, une oreille d'appui et une jouée. Une interprétation de ces dispositions est possible pour des appuis en métal.

Illustration · amàco - S.Bioul, sur base du cours de *Technologie de la construction* (Procès, 2006)

↑ 68

Les parements en terre crue sont idéalement ventilés par une lame d'air au pied de laquelle un dispositif de collecte et d'évacuation des eaux de pluies est prévu.

Image · amàco - S. Bioul



69 ↑↑

La tête de mur doit également être protégée des intempéries durant toute la durée du chantier.

Photo · amàco

L'articulation entre différents matériaux au niveau du linteau doit également faire l'objet d'une attention particulière. La stagnation et l'infiltration d'eau entre deux éléments structurels différents peuvent être évitées au moyen par exemple d'un enduit tramé recouvrant le joint ou d'une pièce de protection et de rejet d'eau (tôle ou bois). Les *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre\** précisent que cette seconde solution permet également de protéger des volets ou fenêtres s'ouvrant vers l'extérieur. Le *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue\*\** sur la technique de la bauge propose quant à lui une solution d'articulation en chanfreinant le linteau.

Si la façade est composée d'un parement séparé du mur porteur par une lame d'air ventilée, un drainage doit être assuré au-dessus du linteau (comme à chaque interruption de la lame d'air) par des joints verticaux laissés ouverts juste au-dessus d'une membrane d'étanchéité. Il s'agit là de règles de l'art applicables aux briques de terre cuites également. Pour aller plus loin, le site *energieplus\*\*\** explicite clairement les détails techniques spécifiques du mur creux.

### Sommet de mur

Le sommet de mur est particulièrement exposé aux intempéries. Deux stratégies permettent de limiter les pathologies en tête de mur : la forme résistant à l'érosion et la couverture. Si la première est largement utilisée dans le monde, la deuxième est préférée dans le contexte européen pour sa minimisation du besoin en entretien régulier. La couverture peut être une toiture avec débord ou un simple chaperon. Ce dernier présente une goutte d'eau de manière à éviter l'écoulement sous la face de l'élément et jusqu'au mur. Durant le chantier, il est également nécessaire de protéger le sommet de mur de la pluie.

Si la couverture ou la couvertine fait défaut, la concentration d'eau provoquée par le dispositif de protection génère des pathologies considérables. Il est donc essentiel de bien concevoir et réaliser ces ouvrages, mais aussi de les entretenir. Le concepteur averti anticipe les besoins d'entretien de ces éléments de manière à les faciliter durant toute la durée de vie du bâtiment. Sur le chantier, les protections mises en place sont identifiées comme telles et contrôlées régulièrement.

\* Houben, Schneegans, CRAterre, et al., 1982

\*\* ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018

\*\*\* UCL-LOCI, Architecture et Climat, 2019

## Rive contre mur et acrotère

Que ce soit au niveau d'acrotères ou de rives contre mur, les articulations entre surfaces d'écoulement des eaux et surfaces verticales en terre crue doivent faire l'objet d'une attention accrue. Idéalement, la volumétrie de l'édifice évitera les détails complexes, notamment dirigeant l'eau vers des parois de terre. Dans tous les cas, des relevés, solins et contre-solins, doivent protéger de l'eau la base des murs au-dessus des toitures et terrasses.

Le *Dossier technique lié à l'ATEX de type A n°2533\*\*\*\** réalisé pour la mise en œuvre de BTC en Guyane\* définit la hauteur minimale du solin ou de l'émergence à 20 cm. Celle-ci peut être réduite à 15 cm si la forme de pente prévient la possibilité de rétention d'eau au pied du mur.

## Mur gouttereau et descente d'eau

Les murs gouttereaux sont particulièrement affectés par un défaut de conception ou d'entretien de la toiture, du chéneau, de la gouttière ou de la descente d'eau. Le concepteur doit tout d'abord être vigilant à la possibilité d'entretenir les ouvrages qu'il conçoit, et l'occupant garder l'œil ouvert sur les réparations à effectuer. Il est également particulièrement attentif en cas d'évacuation des eaux de toitures partiellement ou totalement non canalisée. En effet, le vent peut aisément rabattre sur le mur l'eau rejetée en bas de versant, par une gargouille ou en about de gouttière non raccordée à une descente d'eau. Pour cette raison, il convient d'éviter la disposition de gargouilles sur une façade exposée aux vents dominants et les descentes d'eau non canalisées (une chaîne de pluie peut constituer une canalisation suffisante).



↑ 70

Les détails de rive contre mur doivent être anticipés, voire évités. Le auvent d'accueil du conservatoire européen d'échantillons de sols *Qualiforsol* de l'INRA à Orléans devait être détaché de la façade en pisé pour éviter le raccord délicat. Le projet, conçu par Design & Architecture, associé à NAMA Architecture, a été construit par Héliopsis et Caracol en 2014.

Photo · Paul Kozłowski

—

L'expression *rive contre mur* est utilisée ici pour signifier l'intersection d'un pan de toiture avec un mur de maçonnerie, plus correctement appelée *pénétration* (de Vigan, CSTB, 2006) et abusivement nommée *solin* du nom de l'ouvrage qui la garnit généralement.

→ 71

La descente d'eau de la Maison de champagne, à Crouttes-sur-Marne, canalise efficacement l'eau de pluie tout en rythmant la façade. Ce bâtiment a été conçu par Thierry Bonne accompagné par Wilfredo Carazas pour son expertise terre crue.

Photo · Philippe Dureuil

\*\*\*\* Boutinard, Misse, Chamodot, Crete, et al., 2018







72 ↑

## Murs porteurs

Les murs en pisé du conservatoire européen d'échantillons de sols *Qualiforsol* de l'INRA à Orléans sont réalisés sur un soubassement en béton. Le projet, conçu par Design & Architecture, associé à NAMA Architecture, a été construit par Héliopsis et Caracol en 2014.

Photo · Paul Kozlowski

## Fondations

Les fondations sont idéalement réalisées en matériaux résistants et peu sensibles à l'eau. La terre crue est fortement déconseillée pour cet usage. Le béton de ciment armé est majoritairement utilisé pour réaliser les fondations en Ile-de-France aujourd'hui. La pierre, la brique cuite, le béton cyclopéen ou le bois sont également des solutions qui peuvent être satisfaisantes, mais elles rencontrent difficilement les contraintes mécaniques, de durabilité et réglementaires françaises.

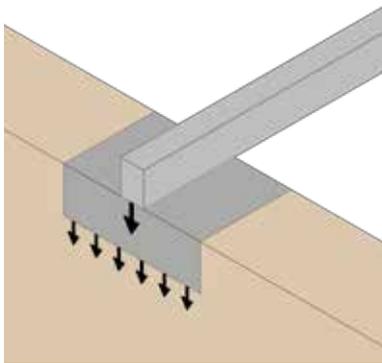
73 →

Maitte Sainz de la Maza et Macari de Torres (Fetdeterra) proposent ici un soubassement composé de deux poutres en I métalliques qui permettent une finition de la base du mur en retrait. Il s'agit d'*Ocean Without a Shore*, construit en 2018 au musée Bill Viola, à Balaguer, en Espagne.

Photo · Fetdeterra

Les fondations sont conçues et dimensionnées de manière conventionnelle, selon la résistance du sol et la typologie structurelle choisie (ossature ou murs), tout en prenant en considération la faible résistance en traction et au cisaillement des matériaux de terre crue ainsi que leur sensibilité à l'eau. Elles doivent ainsi permettre d'éviter tout tassement différentiel des sols de support que les matériaux en terre crue ne seraient pas en mesure de reprendre. Le dimensionnement doit par ailleurs prendre en compte la surcharge souvent générée par les systèmes constructifs massifs en terre crue. Les détails et la réalisation doivent finalement participer à prévenir toute infiltration ou remontée d'humidité dommageable pour la superstructure en terre : mise en place d'une nappe de protection du mur enterré et d'une étanchéité en sus des autres précautions déjà abordées par ailleurs, notamment le traitement des abords, du soubassement et des finitions.





## Base des murs

Le pied des murs porteurs, comme celui des façades, doit offrir une protection contre l'eau. Un lit de maçonnerie stable garantit la protection capillaire : mortier hydrofuge, blocs de béton de ciment ou de pierre naturelle, briques de terre cuite, semelle, voire soubassement en béton de ciment par exemple. La hauteur de cette protection capillaire en base de mur est définie à 2 centimètres dans le *Dossier technique lié à l'ATEX de type A n°2533\** réalisé pour la mise en œuvre de BTC en Guyane.

Durant le chantier, si les dalles et murs sont mis en œuvre avant les toitures, des précautions doivent être prises pour empêcher, en cas de forte pluie, la stagnation d'eau en pied de mur. On parle communément d'*effet piscine*. A titre d'exemple, on peut prévoir une pente sur chape vers l'évacuation ou des solins temporaires en pied de mur. Une alternative qui nécessite une toute autre planification de chantier consiste en ne poser le plancher qu'une fois le bâtiment mis hors d'eau.

## Appui de poutre

Pour éviter le phénomène de poinçonnement au droit de l'appui de poutre, le concepteur ou l'artisan veille à prévoir un asselet (ou achelet), c'est-à-dire une petite poutre dans l'épaisseur du mur qui permet de répartir sur une plus grande surface les charges ramenées dans le porteur par la poutre. Une simple planche de bois peut parfois suffire pour répartir efficacement les efforts. De la même manière, les poutres d'un plancher en bois doivent idéalement être posées sur ou assemblées à un chaînage de répartition (en bois, pierre, béton de ciment armé, ...) ou une mu-raille.

74 ↑↑

La base des murs doit être protégée de l'eau stagnante durant toute la durée du chantier.

Photo · amàco

75 ↑

L'asselet répartit les charges ponctuelles sur le mur.

Illustration · amàco - S. Bioul

76 →

Les murs en briques de terre crue du logement conçu par Jorge Ramón Giacometti et Elena de Oleza Lobet à Quito, en Equateur sont mis en œuvre sur un talon de béton les protégeant de l'eau et des coups.

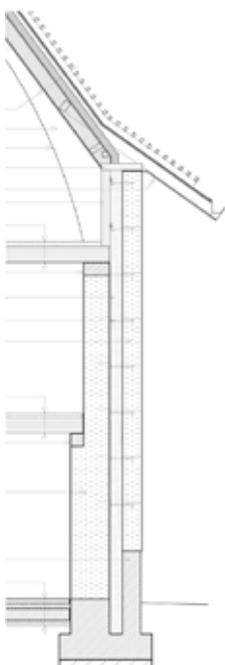
Photo · Jerónimo Zúñiga

## Appui de plancher

L'appui de plancher affecte la structure portante en terre crue différemment selon qu'il est centré sur le mur ou désaxé. Un appui axé sur le mur (ou « à l'intérieur du mur ») peut, en réduisant l'épaisseur de celui-ci, générer divers phénomènes pouvant l'affaiblir. La dilatation et le fluage du plancher peuvent notamment provoquer une fissuration en façade. Les *Recommandations pour*

\* Boutinard, Misse, Chamodot, Crete, et al., 2018





77-78 ↑

Les murs porteurs en pisé du centre d'interprétation du patrimoine archéologique de Dehlingen s'amincissent à chaque niveau pour accueillir le plancher.

Le bâtiment conçu par nunc architectes, a été réalisé par Caracol et l'entreprise J.Gargano.

Photo · Luc Boegly

Illustration · nunc architectes

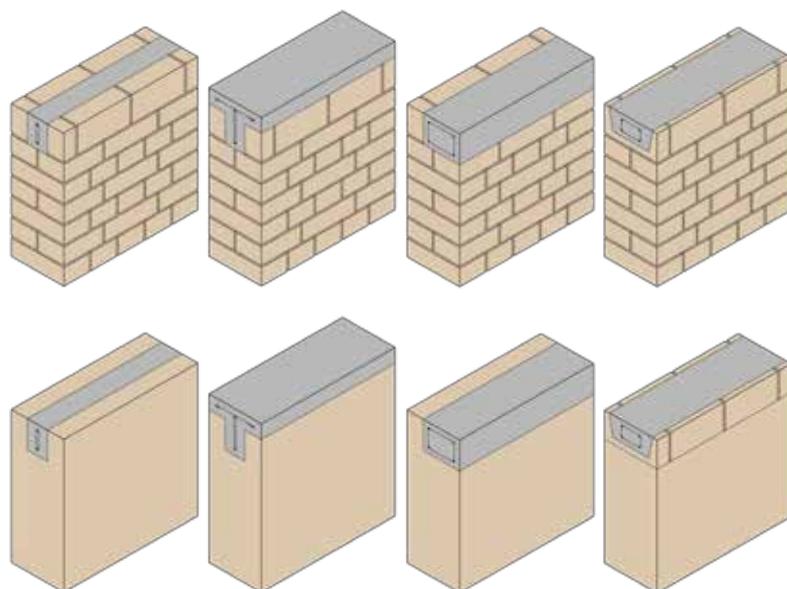
la conception des bâtiments du Village Terre\* détaillent des solutions possibles à ces phénomènes lorsqu'ils risquent d'être la cause d'infiltrations : marquer et remplir au mastic le joint entre plancher et maçonnerie, tramer l'enduit extérieur avec débordements de 15 cm de part et d'autre, ou *Habiller extérieurement les chaînages à l'aide d'un élément en maçonnerie obligatoirement de même nature que la maçonnerie courante\**, placé en fond de coffrage et d'une épaisseur inférieure au tiers de la paroi.

La solution d'un appui excentré permet d'éviter l'affaiblissement du mur en garantissant la constance de sa section et l'homogénéité de son assise au droit du plancher. La pose d'un plancher en bois excentrée sur muraille est rendue difficile par la faiblesse des ancrages possibles dans la terre. Elle peut être réalisée, particulièrement en rénovation, par ancrage traversant et pose d'une clé de tirant. En construction neuve, la solution d'un chaînage intégré au mur auquel les solives peuvent aisément être assemblées est préférée. Les consoles, corbeaux ou encorbellements sont également une alternative intéressante. Le mur peut finalement s'affiner ou se désaxer à chaque niveau de plancher pour dégager la surface d'appui nécessaire pour les solives ou la dalle.

### Renforcements et chaînages

Les parties les plus faibles ou les plus sollicitées des murs doivent généralement être renforcées. Les chaînages sont particulièrement utilisés dans les zones à risques sismiques, où ils reprennent les efforts horizontaux et stabilisent la structure.

\* Houben, Schneegans, CRAterre, et al., 1982



Dans l'architecture vernaculaire, on observe régulièrement un renforcement des angles et abouts de murs par stabilisation dans la masse ou avec des matériaux plus durs et résistants, comme la brique de terre cuite ou le bloc de pierre naturelle, formant un chaînage vertical. Les constructions traditionnelles présentent souvent également des tirants horizontaux, généralement placés dans l'épaisseur du plancher, qui permettent de maintenir les façades. On y trouve également parfois des armatures en fibres végétales ou en métal intégrées à l'épaisseur du mur, en particulier dans les angles.

Aujourd'hui, les chaînages sont généralement réalisés en béton de ciment armé. Le bois et le métal, qui travaillent bien en traction, répondent également aux performances recherchées et sont de plus en plus utilisés. Le chaînage peut être disposé sur toute la largeur du mur ou être de moindre largeur et centré ou excentré sur le mur. Le bétonnage du chaînage sur toute la largeur du mur engendre un risque de coulées sur le mur si la jonction entre le coffrage et le mur n'a pas été bien colmatée. L'utilisation de la terre en coffrage perdu permet d'éviter ce risque de salissures. Elle permet par ailleurs de réduire la quantité de béton de ciment, de supprimer le bois de coffrage et le temps nécessaire à son montage et démontage et, dans le cas de maçonneries de petits éléments, de continuer à maçonner dès que le béton de ciment a été coulé. Des réservations prévues dans les BTC lors de leur fabrication permettent de les utiliser comme coffrage perdu lors de la réalisation des chaînages horizontaux et verticaux. Des blocs peuvent également être maçonnés sur chant de manière à former un coffrage perdu maçonné. Dans le pisé, l'emplacement pour le chaînage peut être réalisé



↖ 79

Le chaînage en béton armé peut être disposé de différentes manières dans le mur en terre crue.

Illustration · amàco - S. Bioul, sur base des *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre* (Houben, Schneegans, CRAterre, et al., 1982)

↑↑ 80

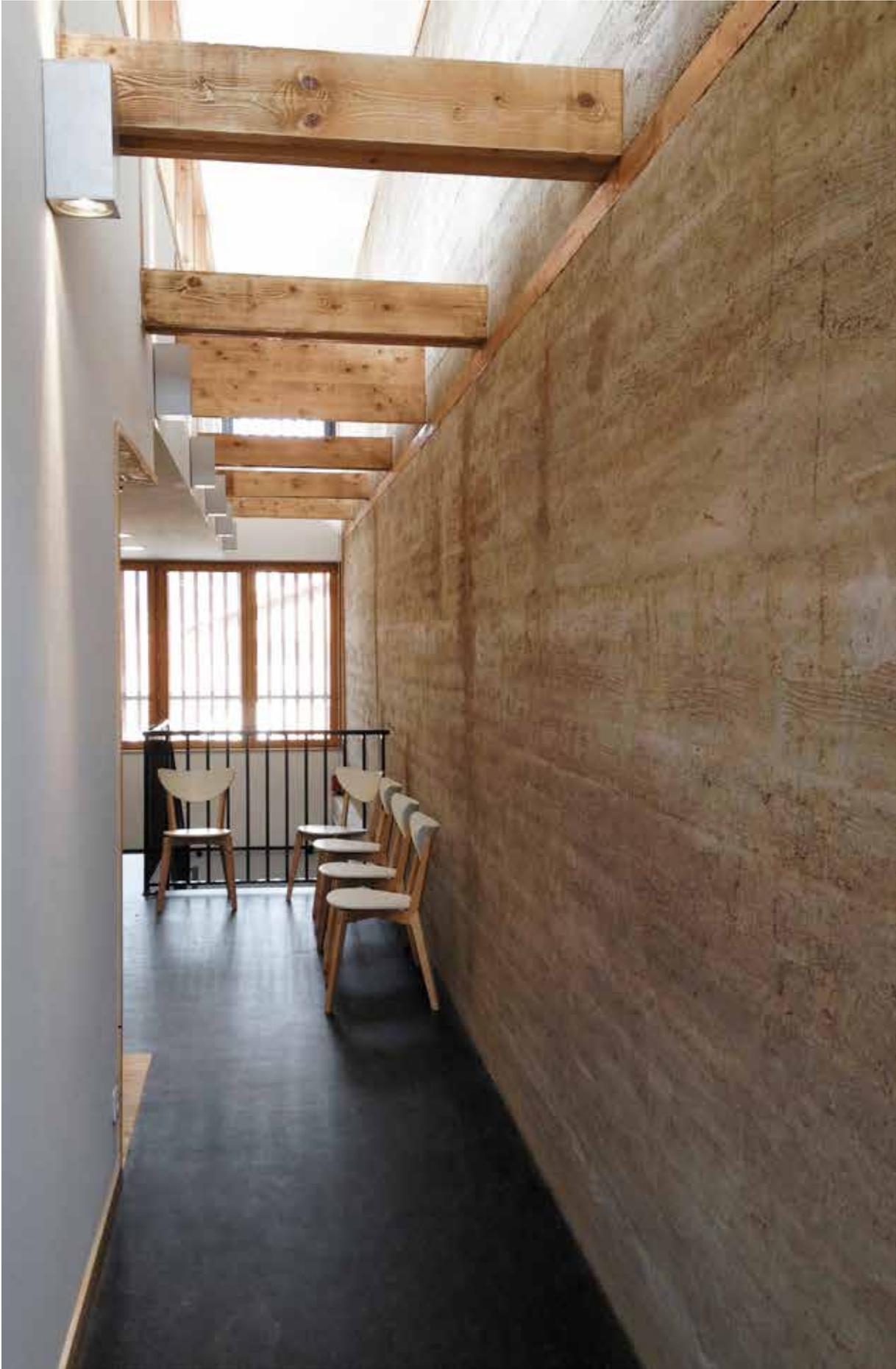
Le conservatoire européen d'échantillons de sols *Qualiforsol* de l'INRA à Orléans dispose d'un chaînage supérieur en béton excentré sur le mur en pisé. Le projet, conçu par Design & Architecture, associé à NAMA Architecture, a été construit par Héliopsis et Caracol en 2014.

Photo · Vincent Robin

↑↑ 81

Le Centre d'Information d'Albreda en Gambie présente des chaînages en bois. Sa conception et le suivi de chantier ont été réalisés par Sébastien Moriset et Nuria Sanchez Munoz du CRAterre.

Photo · CRAterre – S. Moriset





par saignée ultérieure ou par réservation au moment de la mise en œuvre.

Lors de la réalisation des chaînages en béton de ciment armé, et quelle que soit la technique choisie, Les *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre\** conseillent de stabiliser la terre en contact avec le béton de ciment pour « la préserver contre les infiltrations d'eau du béton de ciment lors du coulage et pendant la période de séchage, et assurer ainsi une bonne adhérence entre le béton et la terre ». Cette prescription est rarement respectée sur chantier sans générer de pathologies connues aujourd'hui.

Les chaînages horizontaux en bois, s'ils sont moins courants aujourd'hui en Île-de-France, restent une solution sensible et efficace. Ils peuvent être réalisés à l'aide de chevrons, de planches assemblées ou de madriers.

Le mur peut également être renforcé à l'aide d'armatures dans son épaisseur. Le *Dossier technique lié à l'ATEX de type A n°2533\*\** en définit les caractéristiques et la mise en œuvre dans des murs de BTC. L'éventualité d'une corrosion des aciers à moyen terme pose question. Des stratégies peuvent être mises en place afin de la limiter, comme l'utilisation d'acier galvanisé. La corrosion se développant dans les milieux acides, l'augmentation du pH de la terre, par adjonction de soude par exemple, serait une stratégie utilisée par certains.

\* Houben, Schneegans, CRAterre, et al., 1982

\*\* Boutinard, Misse, Chamodot, Crete, et al., 2018

← 82

Cet espace rural de services de proximité en Auvergne présente un chaînage horizontal en bois sur lequel repose la structure de plancher. Le bâtiment construit en 2012 a été conçu par Boris Bouchet architecte.

Photo · Christophe Camus

↑ 83

Des tirants métalliques sont disposés dans les murs porteurs en terre coulée stabilisée du pôle de ressources pour jeunes entreprises à Saint-Clair-de-la-Tour. Ceux-ci sont placés dans un fourreau souple permettant le libre retrait du mur au séchage sans fissuration. Le bâtiment a été conçu par *Reach & Scharff Architectes* et *Hors les murs Architecture*.

Photo · Kévin Dolmaire



#### 84 ↑ Ancrage de la toiture

La charpente de l'*Ecole Artisanale Meti* est ancrée aux murs de terre crue au moyen d'une structure élaborée.

Architecture · Eike Roswag-Klinge & Anna Herringer

Design et Concept: Anna Herringer

Planification technique · Eike Roswag-Klinge

Clients · Dipshikha Bangladesh

Ingénierie, design structurel et expertise terre crue · Ziegert | Seiler Ingenieure

Encadrement et formation des ouvriers en construction bambou · Emmanuel Herringer (vannier et menuisier), Stefanie Haider (forgeron)

Photo · Kurt Hörbst

Afin d'éviter leur soulèvement par la force du vent, les charpentes sont généralement ancrées aux murs ou lestées. Les besoins d'ancrage diffèrent selon le poids de la couverture et la force du vent dans la région. De nombreuses constructions vernaculaires en France se contentent du poids de la couverture elle-même pour assurer le maintien de la toiture en place. Il existe également divers types de solutions traditionnelles faisant travailler ensemble charpente et maçonnerie ; certaines sont utilisées encore aujourd'hui. L'une des plus notables est l'ancrage apparent de la charpente par l'extérieur du mur. La charpente y est reliée à une section de bois horizontale traversant le mur placée suffisamment bas dans la maçonnerie pour fournir assez de lest et sous le chaînage supérieur s'il en est un. La liaison entre charpente et pièce de bois peut être réalisée à l'aide de tirants métalliques ou de pièces de bois qui enserrant la partie haute du mur. Ces pièces de bois permettent en outre de fixer des jambes de forces utiles au maintien des grandes avancées de toiture.

Une solution généralement plus simple aujourd'hui consiste en l'intégration en montant dans le mur d'une pièce d'ancrage pour la charpente permettant de reprendre des efforts en traction. L'ensemble peut par exemple être composé d'une platine intégrée au mur (à 50 cm du faîte dans du pisé par exemple) liée à une tige filetée métallique boulonnée à la panne sablière.

Si le bâtiment présente un chaînage horizontal supérieur et/ou des piliers en béton de ciment armé, la charpente est alors reliée à ces éléments structurels à l'aide de tiges de fer à béton.

Le passage des armatures métalliques de liaison au sein du mur en terre est possible mais pose la question de la corrosion du métal déjà évoquée. Pour une durabilité garantie, les armatures métalliques sont enrobées de béton de ciment. Pour les maçonneries en BTC, des blocs U peuvent faire office de coffrage perdu à cet effet.

La structure du bâtiment peut finalement présenter des poteaux de bois qui permettent un ancrage aisé de la charpente de toiture et un transfert des efforts vers les fondations. Cette solution permet de limiter la mise en œuvre de béton de ciment. Notons tout de même qu'il est *préférable d'ancrer les toitures sur des chaînages continus plutôt que sur des appuis isolés\**.



↑ 85

Dans cette maison à Jos, au Nigeria, un coffrage perdu en blocs U permet de faire la liaison avec des armatures métalliques entre le chaînage horizontal et la charpente.

Photo · CRAterre - S. Moriset

Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)

→ 86

Les façades de l'école de Veyrins-Thuellin, en Isère, sont composées de murs-trumeaux en pisé protégés par un large débord de toit. Ils ont été réalisés par Heliopsis en 2009. Le bâtiment a été conçu par Design & Architecture, associés à Vincent Rigassi.

Photos · Design & Architecture

---

\* Guillaud, Houben, Dethier, CRAterre, 2006







87 ↑

## Cloisons et remplissages

Un voile en adobes distribue les espaces de la Maison du Parc naturel régional du Gâtinais en Essonne, dessinée par l'agence d'architecture Joly & Loiret. L'épaisseur importante de la cloison lui confère sa stabilité. La terre crue a été mise en œuvre par Destas & Creib en 2010-2011.

Photo · Michel Denancé

### Base des cloisons

Les plinthes permettent, outre la finition propre de l'articulation, la protection de la base des cloisons en terre crue de chocs éventuels et de salissures souvent liées à l'entretien des sols. Dans le cas de parois de briques ou blocs, il est conseillé de prévoir un rang d'éléments stables et résistants ou insensibles à l'eau, comme des briques cuites ou des blocs de terre crue stabilisés.

### Périmètre des cloisons et remplissages

C'est sur le périmètre des cloisons, à leur articulation avec la structure primaire, que vont se jouer deux enjeux importants : leur stabilisation et leur désolidarisation.

S'ils ne sont pas auto-stables de par leur forme, diverses techniques existent pour éviter le renversement des cloisons et remplissages. Ces derniers peuvent tout d'abord être maintenus à l'ossature au moyen de pièces d'ancrage. Le *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2533\** préconise un écartement horizontal maximum entre ancrages de 62 cm ou 2 longueurs de blocs, et un espacement vertical maximal de 45 cm ou 4 assises.

C'est ensuite la forme de l'ossature elle-même qui peut garantir la stabilité de la cloison. Le concepteur peut par exemple proposer une ossature avec feuillures ou une ossature moisée de part et d'autre de la paroi. Un dispositif de maintien de la cloison

\* Boutinard, Misse, Chamodot, Crete, et al., 2018

sur son périmètre peut finalement être prévu, comme une pièce apposée à la manière d'une parclose.

Le traitement du périmètre du remplissage doit également être différencié selon la nature de ce dernier : contreventant ou maçonnerie non-structurale. Une paroi non structurale doit être désolidarisée de la structure comme précisé au NF DTU 20.13.\*\* Des bandes de désolidarisation sur l'ensemble du périmètre permettent d'assurer un travail statique différencié des deux structures. Ce détail limite les répercussions des mouvements de la structure primaire (fluage par exemple) sur les cloisons (toutes techniques confondues). Il convient par ailleurs de bien dimensionner la structure primaire pour en limiter la flèche.

## Baies

Une attention particulière est apportée aux baies dans les cloisons autour desquelles des fissures peuvent se concentrer. Les huisseries à imposte fixées en tête et en pied permettent de raidir les parois de grandes dimensions et de prévenir l'apparition de fissures.

## Mise en œuvre

Afin de limiter les fissures engendrées par la déformation de la structure primaire, les cloisons sont mises en œuvre après enlèvement des étais et décoffrage de la dalle et des poutres de manière à permettre à la flèche instantanée de s'effectuer sans engendrer de contraintes dans les structures non portantes.

→ 88

Des éléments de cloisons dissociés de la structure permettent d'écarter tout risque de fissurations au droit des baies, comme à l'imprimerie Gugler, à Pielach, en Autriche, conçue en 1998 par Ablinger, Vedral & Partner et construite par Lehm Ton Erde Baukunst GmbH.

Photo · Dominique Gauzin-Müller

---

\*\* AFNOR, 2008a







89 ↑

## Franchissements et finitions de sols

La voûte de la cafétéria des Editions Terre Vivante a été réalisée en briques de terre crue en 1993. Le bâtiment a été conçu par Marcel Ruchon.

Photo · A.-L. Antoine & E. Carnevale

Source · Antoine, Carnevale, Genis (dir), Misse (dir), 2016

### Arcs, voûtes et coupoles

Il existe une grande variété de typologies d'arcs, voûtes et coupoles, et de multiples techniques de mise en œuvre, avec ou sans cintre. Si quelques expérimentations récentes font usage du pisé pour réaliser de grands franchissements, c'est traditionnellement et généralement la maçonnerie de petits éléments qui est utilisée à cet effet.

Le dimensionnement précis des arcs est l'une des clefs pour garantir leur durabilité. La règle la plus importante est probablement la suivante : la ligne de force doit être contenue dans le tiers-central de l'arc.

Serge Satprem Maïni étudie les arcs, voûtes et coupoles en terre crue depuis plus de 30 ans à l'Auroville Earth Institute, en Inde. Ses écrits tel que *Building with arches, vaults and domes : training manual for architects and engineers\** et les formations qu'il dispense font référence dans le domaine de l'architecture de terre crue.

### Planchers et finitions de sols

La terre crue et les matériaux à base de terre crue peuvent être utilisés en entrevous, en remplissage et en chape de compression. Les entrevous peuvent par exemple être réalisés en voûtains de briques crues, en hourdis de terre-paille armée ou en

\* Maïni, 2008



palissons (technique assimilée au torchis). Le remplissage peut quant à lui être réalisé au moyen de la terre en vrac ou d'éléments préfabriqués. Pour finir, la chape de terre est réalisée à partir de terre en vrac damée ou d'un mélange de terre, de fibres et d'adjuvants naturels (de bouse de vache et crottin par exemple). La terre damée peut être traitée à l'huile, à la graisse ou à la cire. Il est également possible de stabiliser la couche supérieure de finition afin de renforcer sa durabilité à l'usure.

Ces techniques permettent d'apporter de l'inertie thermique et d'améliorer l'isolation acoustique des planchers.

↖ 90

Les entrevous du centre scolaire de Laongo au Burkina Faso sont réalisés en voûtains de BTC. Le bâtiment a été conçu par Kéré Architecture.

Photo · CRAterre – S. Moriset

Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)

↑ 91-92

Les hourdis en terre-paille peuvent être posés sur des poutrelles béton armé.

Photo · CRAterre

Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)

→ 93

Ce sol en terre crue a été conçu et réalisé par CArPE dans une maison en paille porteuse à Vers-chez-les-Blanc, Lausanne, en 2010.

Photo · Noé Cauderay







## Stratégies d'intégration à l'échelle du bâti

Les caractéristiques techniques des matériaux et les dispositions constructives constituent une bonne base pour mener une réflexion sur les stratégies d'intégration de la terre crue à une échelle plus large du bâtiment, mais bien d'autres éléments de contexte sont à prendre en compte.

Ce chapitre apporte un premier éclairage sur quelques stratégies que les concepteurs et promoteurs peuvent mettre en œuvre au sein d'une construction en Île-de-France aujourd'hui. Elles sont ici structurées, afin de donner un cadre à la réflexion, analysées et illustrées.

### Des stratégies contextualisées

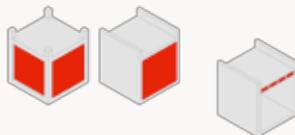
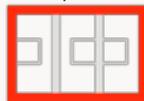
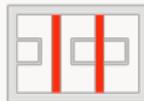
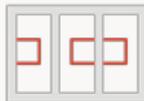
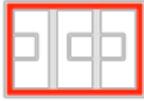
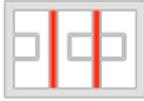
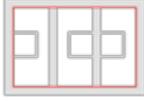
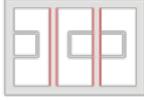
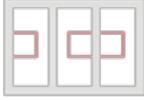
La diversité des options d'intégration possibles et la multiplicité des facteurs influençant les choix montrent la nécessité d'établir la pertinence de la stratégie en fonction du contexte du projet.

← 1



Ce pôle culturel situé à Cornebarrieu, en France, comprend une salle de conférences, une médiathèque et une salle des fêtes. Conçu par l'atelier Philippe Madec, il atteint le standard passif. La structure porteuse du bâtiment est en bois alors qu'une paroi de blocs de terre comprimée délimite l'espace de l'auditorium et porte le plancher de sa mezzanine.

Photo · © Pierre-Yves Brunaud

		FAÇADES	PAROIS SÉPARATIVES	CLOISONS DISTRIBUTIVES	PLANCHERS
REPLISSAGE					
STRUCTURE					
FINITION INTERIEURE					
FINITION EXTERIEURE					

2 ↑

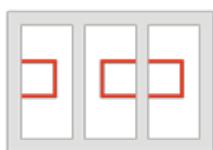
## Options d'intégration et leurs contraintes techniques

Ce tableau des options d'intégration associe d'une part l'usage fait de la terre et d'autre part son emplacement dans le bâtiment au sein d'un élément constructif.

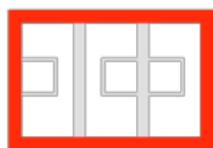
Schémas · S. Bioul

La structuration des options d'intégration est organisée sous la forme d'un tableau à double entrée : d'une part l'usage fait de la terre et d'autre part son emplacement dans le bâtiment au sein d'un élément constructif devant remplir une fonction spécifique. Les contraintes imposées à ces options d'intégration varient selon les caractéristiques du bâtiment (type, fonction, hauteur,...).

### Éléments constructifs selon leurs fonctions



Les *cloisons distributives* divisent l'espace en regroupant des ambiances et activités similaires ou associées. Il s'agit par exemple des cloisons au sein d'un logement unifamilial. Pour assurer leur fonction principale d'agencement des espaces, elles présentent une bonne résistance à la flexion, aux chocs durs et mous et aux battements de portes. Elles doivent par ailleurs idéalement permettre la fixation d'éléments de mobilier ou de décoration.



Les *façades* sont ici les parois permettant de séparer l'ambiance extérieure de l'intérieure. Outre les caractéristiques de base attribuées aux cloisons distributives, les façades doivent présenter une certaine étanchéité à l'eau et à l'air et de bonnes performances en matière d'isolation thermique et acoustique. Leur stabilité doit par ailleurs être garantie, notamment sous la charge du vent. Des contraintes liées à la sécurité incendie peuvent finalement s'ajouter selon le type de bâtiment considéré et sa fonction.

Les *parois séparatives* dissocient des espaces où se tiennent des activités différentes, pouvant potentiellement se gêner. Il s'agit

par exemple de la paroi entre deux logements, entre parties communes et parties privatives ou entre deux salles de classes. Elles doivent répondre à des exigences plus élevées que les cloisons distributives. Outre une meilleure résistance aux chocs, elles doivent être plus performantes en matière d'affaiblissement acoustique et de réaction et résistance au feu.

Les *planchers* regroupent ici l'ensemble des parois horizontales au sein d'un bâtiment. Si différencier les planchers simples des planchers séparatifs et des toitures serait plus rigoureux, les applications sur les parois horizontales étant aujourd'hui limitées en Île-de-France, l'ensemble de ces parois sont regroupées par souci de simplification.

### Usages au sein des éléments constructifs verticaux

Le *remplissage non structurel* doit présenter un minimum de retrait et de déformations. Idéalement, il permet l'accroche efficace de finitions de surface (enduit, peinture, ...) mais aussi l'ancrage, avec une bonne résistance à l'arrachement, de pièces pour suspendre ou maintenir divers équipements ou finitions apposées (isolant, bardage, mobilier, décoration, équipement sanitaire, ...).

La *structure porteuse*, outre les qualités demandées aux remplissages, doit être en mesure de reprendre des efforts mécaniques importants, majoritairement en compression et en cisaillement.

La  *finition intérieure* doit présenter une bonne adhérence au support et une bonne résistance à l'abrasion. Idéalement, elle répond aux souhaits esthétiques des occupants et permet une luminosité suffisante dans les lieux de vie.

La  *finition extérieure*, exposée à une ambiance plus agressive, voire aux intempéries, doit répondre à des exigences plus élevées que la finition intérieure. Sa cohésion et sa résistance à l'abrasion sont idéalement supérieures. Sa réaction au feu doit par ailleurs être limitée. Si elle est exposée aux intempéries, elle doit finalement être peu sensible à l'eau et présenter une bonne durabilité aux actions du gel et du dégel.

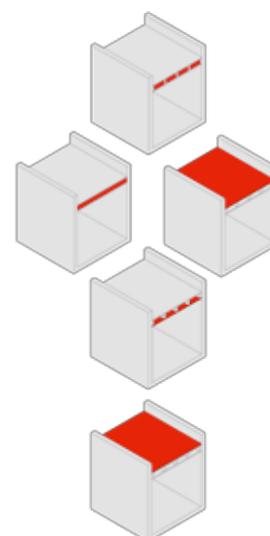
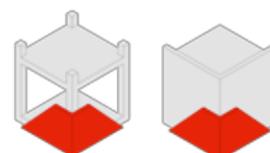
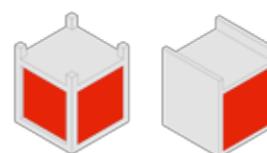
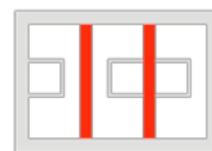
### Usages au sein des éléments constructifs horizontaux

Le *remplissage non structurel* des planchers (généralement en structure bois) participe à améliorer leur résistance acoustique et au feu.

La *structure porteuse* des planchers concerne des éléments qui doivent bien travailler en flexion. Ils sont d'autant plus utiles que leur portée peut être grande.

La  *finition inférieure* habille la sous-face du plancher. Le faux-plafond est d'autant plus intéressant qu'il permet d'améliorer l'acoustique du local qu'il couvre. Sa réaction au feu doit être limitée.

On attend de la  *finition supérieure* du plancher qu'elle soit durable notamment en résistant bien à l'abrasion, aux chocs et à l'eau.



		FAÇADES			PAROIS SÉPARATIVES		
		OSSATURE PORTEUSE	REFENDS PORTEURS	FAÇADES PORTEUSES	OSSATURE PORTEUSE	REFENDS PORTEURS	FAÇADES PORTEUSES
REMPLISSAGE							
STRUCTURE							
FINITION INTÉRIEURE							
FINITION EXTERIEURE							

### 3 ↑ Typologies structurelles

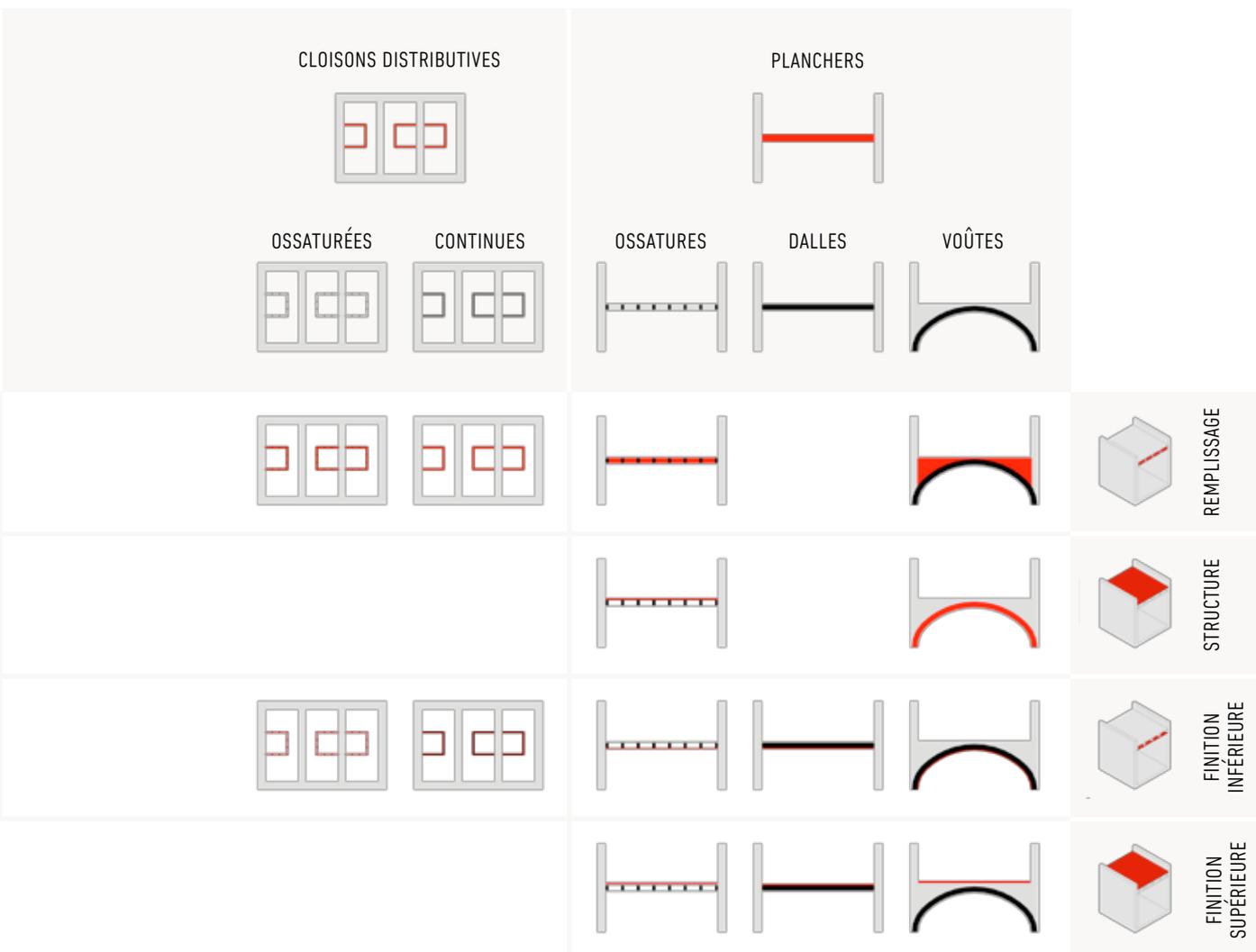
L'intégration des typologies structurelles complète le tableau des options d'intégration.

Schémas · Sophie Bioul

L'ajout des typologies structurelles envisageables complexifie le tableau des options d'intégration et rend ainsi davantage visible la multiplicité des solutions possibles d'intégration de la terre crue au sein du bâti.

Les systèmes structurels principaux sont schématisés comme suit : *ossature porteuse*, *refends porteurs* et *façades porteuses*. L'*ossature porteuse* concerne des éléments ponctuels n'ayant pas de fonction de division d'espaces. Toute paroi intérieure porteuse est quant à elle schématisée par la terminologie *refends porteurs*, par opposition aux *façades porteuses* situées sur la périphérie du bâti. Il s'agit ici de développer un modèle dont les illustrations sont schématiques, les parois peuvent être courbes et les typologies combinées.

Les cloisons peuvent quant à elles faire partie de ces deux catégories : *ossaturées* ou *continues*. Les ossatures de cloisons sont généralement réalisées à l'aide de sections de bois ou de



profilés métalliques. Le remplissage peut ensuite s'effectuer par pose d'un parement (plaque, planches, nattes, ...) et/ou par maçonnerie ou remplissage des interstices. Les cloisons continues peuvent quant à elles être composées de briques ou blocs maçonnés ou de grands éléments assemblés (telles les cloisons alvéolaires prisées sur les chantiers Parisiens).

Finalement, les systèmes structurels de planchers sont ici distingués selon trois familles : *ossatures*, *dalles* et *voûtes*. Les *ossatures* sont composées d'éléments distincts assemblés : les poutres et les entrevous. Les *dalles* regroupent les dalles pleines et les planchers collaborants. Enfin, les dômes, voûtes et toutes structures qui travaillent en compression sont rassemblés sous la terminologie *voûtes*. L'intégration de terre crue au sein des planchers est aujourd'hui peu abordée et mise en œuvre. Nous disposons donc de peu de retours d'expériences sur des applications contemporaines de ces techniques. Ces options d'intégration ont cependant un potentiel de développement important qui mériterait une étude plus approfondie.

## Données associées aux matériaux et à la filière terre crue

Pour analyser une option d'intégration de la terre au sein du bâtiment, il nous faut mettre en regard les contraintes qu'elle induit (selon l'usage qui est fait de la terre et sa localisation dans un élément constructif ayant une fonction spécifique et selon les caractéristiques du bâtiment considéré) et différentes données qui peuvent être qualifiées d'*intemporelles* ou *conjoncturelles* :

- les qualités intrinsèques intemporelles des matériaux ;
- les facteurs conjoncturels liés à la filière, qui ont un impact important sur la mise en œuvre et la gestion du projet.

### Données intemporelles liées aux matériaux

Les contraintes et opportunités liées aux matériaux concernent tout d'abord leurs caractéristiques techniques et spécificités de mise en œuvre que nous avons largement détaillées dans les chapitres précédents de ce mémoire. Retenons comme points de vigilance principaux la sensibilité des matériaux à l'eau et leur faible résistance en traction. Rappelons comme opportunités à saisir leur bilan énergétique et carbone favorable ainsi que leur capacité de régulation hygrothermique. Il convient de noter également les qualités sensibles des matériaux en terre crue.

### Données conjoncturelles liées aux pratiques constructives et à la filière

Outre les caractéristiques des matériaux, il nous faut également prendre en compte les pratiques constructives actuelles et le développement de la filière. Si le nombre de projets réalisés augmente chaque année, la terre crue reste un matériau de construction encore peu utilisé à l'échelle nationale, et en particulier en Île-de-France.

Aujourd'hui, le béton et la plaque de plâtre règnent en maître à Paris. Les entreprises qui les mettent en œuvre sont des acteurs importants et influents du secteur. Les partenariats (officiels ou tacites) établis entre ces entreprises et les aménageurs, architectes et promoteurs structurent aujourd'hui l'acte de bâtir. Les projets que Cycle Terre accompagne actuellement en Île-de-France montrent qu'il est rarement envisageable de les délaissier totalement. S'il est prévu, sur certains projets, de réduire leurs lots avec diplomatie, l'idéal serait certainement de les accompagner à la transition vers des matériaux bio et géo-sourcés dont la mise en œuvre est proche de leurs savoir-faire. En effet, une simple mise à niveau suffit pour former un maçon à la pose de blocs de terre comprimée, un plaquiste à la pose de panneaux de terre extrudée ou un enduiseur à la mise en œuvre des enduits de terre. Cependant, nous savons que, pour opérer un changement durable de nos pratiques constructives, il ne suffira pas de remplacer ou faire évoluer l'un des acteurs du secteur. Il faudra revoir totalement nos habitudes de conception et de gestion de l'acte de bâtir, notamment en partant de l'étude des ressources disponibles et de leurs caractéristiques

pour concevoir le projet.

Le manque de maturité et de développement de la filière amène d'autres difficultés. Tout d'abord, la filière française ne dispose pas de réglementation efficace. Cette carence mène à une friolosite de certains acteurs de la construction rendant difficile la concrétisation des projets. Elle peut ainsi s'avérer coûteuse si, par exemple, une ATEx de type B est demandée. Les acteurs de la filière s'organisent cependant pour combler ce manque : les guides de bonnes pratiques, les quelques ATEx ou la norme XP P13-901 sur la maçonnerie sont de premières étapes vers l'encadrement des pratiques pour la mise en confiance des interlocuteurs.

Ensuite, si la matière première est largement disponible en zone urbaine (la terre de déblais), les matériaux en terre crue y sont, eux, peu présents, et en particulier à Paris. On observe également un déficit de savoir-faire. Peu d'entreprises d'envergure en Île-de-France possèdent une expérience de mise en œuvre notable de terre crue. Cela complexifie la procédure d'appel d'offre et rend presque impossible le jeu de la concurrence.

Le manque de connaissances et de savoir-faire des entreprises et artisans ainsi que leur rebut éventuel à se former à de nouvelles techniques peuvent également les mener à gonfler exagérément les prix de pose. Outre ces facteurs psychologiques indéniables, un certain surcoût de la fourniture et de la mise en œuvre par rapport aux techniques plus conventionnelles est aujourd'hui justifié. On peut tout d'abord raisonnablement prévoir à l'avenir une baisse du coût des matériaux et de leur mise en œuvre avec l'organisation de la filière, la multiplication des lieux de production, le développement de matériaux plus performants et la dissémination des savoir-faire. Par ailleurs, la main d'œuvre supplémentaire généralement nécessaire sur les chantiers de construction en terre crue permet de soutenir une économie locale et humaine. Aussi, le surcoût qui lui est associé tend à être compensé par les économies réalisées sur l'énergie grise et d'usage du bâtiment. Or celles-ci seront d'autant plus marquées avec l'augmentation du coût de l'énergie.

Certaines techniques constructives et certaines options d'intégration présentent un surcoût plus important que d'autres. La définition d'une stratégie d'intégration passe donc forcément par une étude budgétaire des techniques et options d'intégration considérées.

Rappelons que ces freins sont conjoncturels, liés à une filière en plein essor. Les projets, les formations professionnelles et les sites de production de matériaux se multiplient car les matériaux en terre crue répondent aux préoccupations environnementales, économiques et sociétales actuelles. La filière bénéficie d'une conjoncture favorable à son développement et les acteurs de la construction en terre se mobilisent pour l'organiser.

## Enjeux stratégiques du projet

Afin de définir une stratégie pertinente pour un projet spécifique, les contraintes techniques associées aux options d'intégration et les données liées aux matériaux et à leur mise en œuvre doivent finalement être confrontées aux enjeux stratégiques spécifiques au projet d'étude.

Les contraintes stratégiques rencontrées sont généralement d'ordre partenariales et budgétaires. Les premières imposent de travailler avec certaines entreprises, bureaux d'études et bureaux de contrôle qui ont certaines connaissances et savoir-faire. Il n'est pas toujours évident d'arrêter une collaboration, de réduire les lots d'une entreprise ou de demander à un partenaire de se former à de nouvelles techniques. Ces difficultés sont fortement associées au développement de la filière exposé plus tôt. Les contraintes budgétaires conditionnent quant à elles le choix des techniques et, compte tenu du surcoût actuel, l'ampleur de l'intégration.

Par ailleurs, les motivations stratégiques pour utiliser la terre crue dans un projet peuvent être diverses : réduire son énergie grise et/ou son énergie d'usage, améliorer le niveau de confort de l'habitat, ou revendiquer un argument de vente supplémentaire, auprès des clients mais aussi des politiques. Si l'amélioration du confort convainc de nombreux particuliers, l'argument commercial est généralement prépondérant dans les projets de développeurs. Associé à la contrainte budgétaire, il implique souvent de rendre la terre visible par le plus grand nombre. Ainsi, pour maximiser l'impact par rapport au coût, les développeurs choisissent une mise en œuvre en parement de façade ou dans les espaces communs. Cette stratégie avant tout commerciale ne répond pas aux contraintes et opportunités offertes par les matériaux en terre crue. En effet, ils sont alors mis en œuvre dans des contextes particulièrement agressifs où leurs capacités de régulation hygrothermique ne sont pas exploitées. Si elles ont leurs raisons d'être et ne doivent pas être écartées d'office, de telles stratégies pourraient s'avérer contre-productives pour la filière. Pour établir la meilleure stratégie d'intégration pour un projet particulier, il est donc nécessaire d'en cerner les enjeux.

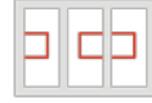


← 4

REPLISSAGE



CLOISONS  
DISTRIBUTIVES



Selon Conrad Lutz (2009), le Green Office, un immeuble de bureaux de 1300 M<sup>2</sup> à Givisiez, en Suisse conçu par Lutz architectes et finalisé en 2007, consomme, à l'usage, le dixième d'un bâtiment standard équivalent. Par ailleurs, l'utilisation de matériaux écologiques à faible énergie grise a permis, sans surcoût notable, d'économiser 50% d'énergie à la construction, ce qui correspond à environ 100 ans de chauffage. Les remplissages en BTC apportent l'inertie thermique au bâtiment. Ils sont totalement désolidarisés de l'ossature bois. Photo · C. Cuendet

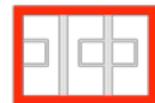


← 5

STRUCTURE



FAÇADES



L'immeuble de bureaux B05 à Lyon associe des façades porteuses en éléments de terre crue préfabriqués à une ossature bois intérieure. Il a été conçu par Clément Vergély architectes, associés pour l'occasion à Diener & Diener Architekten et Michel Desvigne. La réalisation du gros-œuvre terre crue a été prise en charge par Nicolas Meunier

Photo · Leo Boulicot

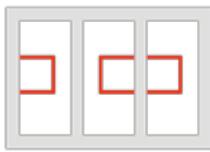
## Analyse critique des options d'intégration

La structuration des options d'intégration nous permet d'ordonner l'analyse selon, d'une part l'élément constructif d'intégrations envisagé, et d'autre part l'usage prévu pour la terre crue au sein de cet élément.

Les qualités des matériaux en terre crue exploitées quelle que soit la stratégie d'intégration, comme son intérêt écologique son accessibilité ou son ouvrabilité, ne sont pas ici rappelées.

### Avantages et inconvénients selon l'élément d'intégration

#### Les cloisons distributives



+

Régulation hygrothermique

Inertie

Peu d'implication structurelle

Peu de contraintes

Possibilité de panneaux radiants

-

Compétitivité

Surcoût

Surcharge

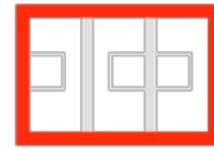
Les cloisons distributives étant situées dans le volume chauffé, l'intégration de terre crue y contribue efficacement à la régulation hygrothermique de l'ambiance intérieure, permettant une amélioration notable du confort et la réduction des consommations énergétiques. De plus, ces cloisons réalisées en terre crue peuvent accueillir efficacement et sans pathologies des systèmes de chauffage et de refroidissement radiants. La masse volumique plus élevée de la terre par rapport au plâtre communément utilisé dans ces éléments leur confère par ailleurs une meilleure résistance acoustique à épaisseur équivalente. Finalement, les performances requises pour les cloisons distributives étant très limitées, elles sont facilement rencontrées. Ces contraintes réduites et l'absence d'implications structurelles rassurent les acteurs du projet qui souhaitent limiter les risques.

Le frein principal rencontré pour mener à terme les projets intégrant de la terre crue dans les cloisons distributives est le manque de compétitivité économique de ces systèmes constructifs. L'industrie des plaques de plâtre a optimisé un système très économique (23€/m<sup>2</sup>) et d'épaisseur extrêmement faible (5 cm fini) avec lequel il est difficile de rivaliser. La cloison distributive en terre crue est à ce jour l'élément représentant le surcoût le plus élevé par rapport aux techniques pratiquées sur chantier en Île-de-France. Pour le limiter, il faudrait d'une part développer des matériaux et systèmes plus performants, permettant une mise en œuvre plus rapide et une épaisseur moindre, et d'autre part développer la production industrielle de ces matériaux, réduisant les coûts de production. Notons par ailleurs que la masse volumique élevée de la terre crue, positive en ce qui concerne l'acoustique, occasionne une surcharge à prendre en compte dans le dimensionnement des planchers et porteurs.

## Les façades

Les façades doivent être plus performantes que les cloisons, et les acteurs du projet ont pour habitude d'y mettre le prix nécessaire. Les variantes intégrant de la terre crue peuvent atteindre le même prix que le système constructif habituel, voir même être plus économiques. La masse volumique élevée de la terre crue lui confère par ailleurs une bonne résistance acoustique mise à profit en façade pour limiter, à l'intérieur, la perception des bruits extérieurs.

On peut cependant questionner la pertinence de mettre en œuvre en façade un matériau aussi peu performant que la terre crue dans le domaine de l'isolation thermique. En effet, une ossature remplie de matériaux isolants sera nettement plus efficace pour limiter les échanges de chaleur entre intérieur et extérieur. Par ailleurs, les façades présentent un certain nombre de détails plus ou moins complexes, notamment au droit des ouvertures, qu'il faudra adapter au matériau terre en tenant compte de sa faible résistance en traction.



+

Isolation acoustique

Compétitivité

-

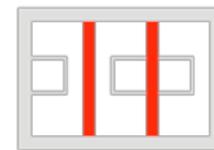
Non isolant thermique

Détails complexes d'intégration des baies

## Les parois séparatives

Tout comme les cloisons distributives, les parois séparatives composées de terre crue contribuent efficacement au confort hygrothermique intérieur et permettent de réduire les consommations énergétiques d'usage du lieu. La masse volumique élevée des matériaux en terre crue permet par ailleurs d'assurer aisément le respect des normes acoustiques strictes applicables à ce type de parois.

Les systèmes constructifs à base de terre crue actuels permettant de répondre aux exigences applicables aux parois séparatives sont plus épais que leurs contreparties habituelles. Ainsi, une perte de surface habitable doit être anticipée. La portance limitée des éléments peut également être un frein, si les refends doivent reprendre des charges importantes.



+

Isolation acoustique

Régulation hygrothermique

Inertie

-

Portance limitée

Épaisseur

## Les planchers

La résistance acoustique des planchers en bois peut être améliorée par l'adjonction de terre crue au système constructif. Celle-ci procure également la régulation hygrothermique idéale pour le confort.

La masse de la terre crue apportant isolation acoustique occasionne dans le même temps une surcharge à prendre en compte dans le dimensionnement des porteurs.



+

Isolation acoustique

Régulation hygrothermique

Inertie

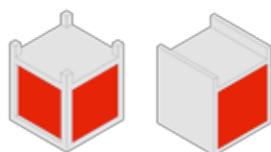
-

Portée limitée

Surcharge

## Avantages et inconvénients selon l'usage vertical

### Remplissage non structurel



+

- Peu d'implication structurelle
  - Mise en œuvre possible à couvert
- 
- Détails du périmètre complexes
  - Étanchéité difficile
  - Pas d'économie structurelle
  - Composer avec les entreprises
  - Inadapté à certaines techniques

L'absence d'implications structurelles des remplissages rassure les acteurs du projet qui souhaitent limiter les risques. Un travail sur le phasage du chantier peut par ailleurs permettre de mettre en œuvre les matériaux en terre crue une fois le bâtiment hors eau, un avantage non négligeable pour leur préservation sur chantier. Notons cependant que le remplissage a posteriori est très complexe, voire impossible, avec certaines techniques comme le pisé réalisé in situ.

Si cette option d'intégration en séduit plus d'un, elle constitue un compromis qui ne permet pas de faire l'économie de la structure. Le doublon occasionné lorsque la terre pourrait elle-même assurer la fonction portante est source de surcoût. Par ailleurs, la réglementation impose que tout remplissage non structurel soit désolidarisé de la structure porteuse. Cette contrainte qui permet d'éviter des désordres structurels complexifie les détails en périphérie de parois dont l'étanchéité à l'air doit par ailleurs généralement être assurée, pour des raisons thermiques ou acoustiques. Cette option d'intégration impose finalement de réduire les lots des entreprises mettant en œuvre le béton. La faisabilité d'une telle approche doit être évaluée selon le contexte et les partenariats préétablis avec certaines entreprises.

### Structure porteuse



+

- Economie de la structure
  - Simplicité
  - Parti architectural fort
  - Impact écologique positif important
- 
- Portance limitée
  - Acteurs frileux
  - Composer avec les entreprises

Proposer une structure porteuse en terre est une option radicale qui garantit la simplicité du système constructif et nourrit un parti architectural fort. Certains parlent de l'émotion qu'ils ressentent dans un bâtiment dont les murs sont en terre crue. S'affranchir de tout élément porteur complémentaire est par ailleurs une source d'économie. Pour finir avec les avantages de cette option d'intégration, l'ampleur de l'intervention, en considérant qu'elle vise à remplacer une grande quantité de matériaux hautement énergivores comme le béton, garantit un impact écologique positif conséquent. Si, pour des raisons techniques ou pour rassurer certains acteurs, il est décidé de stabiliser la terre, l'intérêt de la stratégie dans le domaine de l'économie du carbone et de l'énergie sera perdu. Elle conservera par contre l'économie faite sur la ressource naturelle non renouvelable qu'est le sable.

Les capacités mécaniques du matériau invitent à construire des bâtiments relativement bas, de quatre niveaux maximum. Par ailleurs, les techniques de construction en terre crue étant aujourd'hui peu réglementées, il pourrait s'avérer laborieux de fédérer l'ensemble des acteurs du projet, et notamment les bureaux de contrôles, autour de cette option. Finalement, tout comme l'option d'intégration en remplissage, cette stratégie impose la réduction, voire la suppression de lots de mise en œuvre de béton. Celle-ci peut être rendue difficile, ou même impossible, selon les partenariats officiels ou tacites préexistants entre acteurs du projet.

Pour encadrer la conception, anticiper certains points de vigilance et éclairer les détails techniques, un bureau d'études spécialisé peut accompagner les agences d'architecture sur cette option d'intégration.

### Finition intérieure

Les finitions intérieures en terre crue comportent beaucoup d'avantages. Même avec une épaisseur réduite, elles régulent l'hygrométrie et la température de l'habitat. Grâce à leur comportement exemplaire à la vapeur d'eau, elles peuvent accueillir efficacement et sans pathologies des systèmes de chauffage et de refroidissement radiants. Leur mise en œuvre est agréable et aisée et n'a pas d'implication structurelle. Leur rendu visuel est particulièrement qualitatif et leur visibilité en fait un argument commercial important.

S'il s'agit de remplacer des plaques de plâtre, il faut cependant évaluer la possibilité de réduire, voire supprimer le lot du plaquiste. La mise en œuvre des plaques de terre étant proche de celle des plaques de plâtre, si l'entreprise conventionnelle est intéressée, une simple formation de mise à niveau par un artisan qualifié est aussi possible. Notons finalement que ces finitions représentent un volume réduit par rapport aux autres postes du bâtiment. Pour améliorer notablement l'énergie grise du bâtiment, cette option d'intégration seule n'est pas suffisante.

### Finition extérieure

La finition extérieure en terre crue intéresse beaucoup les développeurs immobiliers, tout d'abord pour la communication qu'elle permet. En effet, la terre crue offre une qualité esthétique à la façade qui rend la démarche particulièrement visible. Il est généralement possible de débloquer du budget pour un tel impact. Par ailleurs, cette option d'intégration s'avère compétitive face à d'autres finitions de façade de standing comme le bardage métallique, le bardage bois ou le parement de briques cuites.

Il faut cependant prendre en compte les risques liés à cette option d'intégration. En effet, les matériaux de terre crue peuvent être fortement affectés par les intempéries. Une mise en œuvre sur façade abritée est généralement recommandée, et une attention accrue doit être portée à chacun des détails techniques. Il est conseillé de faire appel à un bureau d'études spécialisé pour accompagner cette option d'intégration. La mise en œuvre en parement généralement préférée dans le contexte d'Ile-de-France demande par ailleurs de prévoir une épaisseur suffisante pour le complexe de façade afin de garantir la présence d'une lame d'air ventilée et drainée entre le parement et le mur. Malheureusement, l'apport de cette mise en œuvre à l'extérieur du volume chauffé et ventilée est négligeable en ce qui concerne la régulation hygrothermique de l'ambiance intérieure.



+

Régulation hygrothermique

Inertie

Pas d'implication structurelle

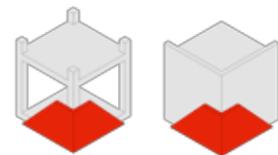
Visibilité & Esthétique

Possibilité de panneaux radiants

-

Impact écologique positif faible

Composer avec les plaquistes



+

Budget disponible

Compétitivité

Visibilité

Esthétique

-

Durabilité aux intempéries

Épaisseur

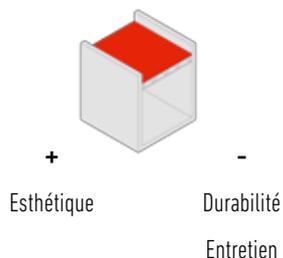
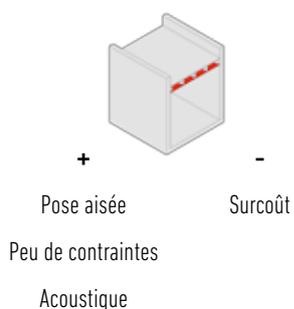
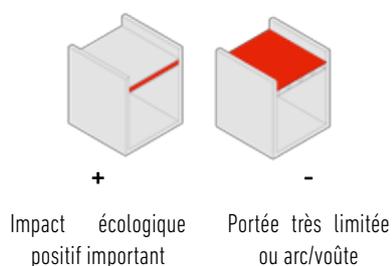
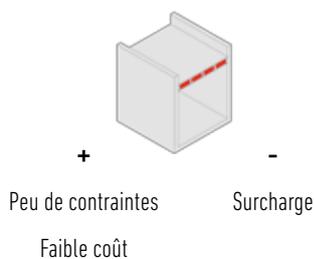
Aucun gain hygrothermique

## Avantages et inconvénients selon l'usage horizontal

L'utilisation de terre crue dans les planchers est aujourd'hui peu répandue. Les systèmes constructifs qui s'y rapportent restent par ailleurs à développer et étudier. Leur analyse, idéalement nourrie par le retour d'expériences d'accompagnement, restera donc ici succincte.

### Remplissage non structurel

Le remplissage de planchers en bois avec de la terre crue en vrac ou en éléments préfabriqués présente peu de contraintes et son surcoût est limité. Il occasionne une surcharge qui doit être prise en compte dans le dimensionnement de la structure de plancher et des murs porteurs.



### Structure porteuse

En remplaçant un matériau particulièrement énergivore et producteur de gaz à effet de serre comme le béton, les entrevous (hourdis et voûtains) de terre crue améliorent fortement le bilan environnemental du bâti construit. Qu'ils soient réalisés en voûtains de briques crues, en hourdis de terre-paille armée ou en palissons, ils sont cependant de portée très limitée, la terre supportant mal la flexion. Les franchissements plus importants peuvent être réalisés au moyen d'arcs ou de voûtes qui travaillent en compression, mais ces techniques engendrent une perte de surface habitable ou une élévation des murs plus importante.

### Finition inférieure

Le faux-plafond en terre crue est l'option d'intégration horizontale qui intéresse le plus les développeurs immobiliers actuellement. La pose de plaques de terre est aisée et celles-ci améliorent le confort acoustique du local qu'elles ornent. Elles représentent cependant un surcoût par rapport aux plaques de faux-plafond conventionnelles.

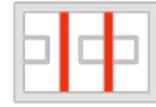
### Finition supérieure

La finition de sol en terre crue offre un cachet indéniable aux pièces qui en bénéficient. Elle nécessite cependant une attention au quotidien pour éviter l'usure, le poinçonnement et les coups, et un entretien régulier. Elle n'est à conseiller qu'à des occupants attentifs et engagés.



← 6

STRUCTURE PAROIS SÉPARATIVES



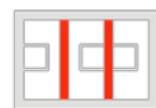
Des murs de pisé constituent la structure porteuse de cette maison de santé se développant en R+1 partiel à Badonviller, en Meurthe-et-Moselle. Elle a été conçue par Mil Lieux Architecture et réalisée en 2013. Les éléments préfabriqués dont la hauteur correspond à un niveau reposent sur un talon en béton traité contre les remontées capillaires posé directement sur la dalle.

Photo · Stéphane Girard



← 7

REPLISSAGE PAROIS SÉPARATIVES

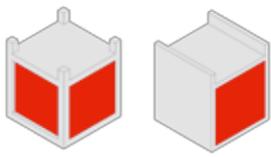
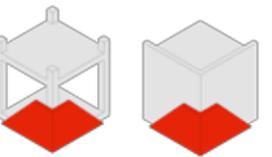


Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly architectes proposent, pour le Groupe scolaire des Hauts du Moulin, à Villepreux, des refends séparatifs non-porteurs en BTE (briques de terre extrudée).

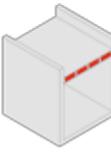
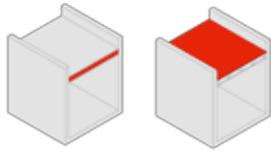
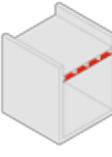
Photo · P.-E. Loiret & S. Joly, architectes - P.-E. Loiret

## Tableaux de synthèse

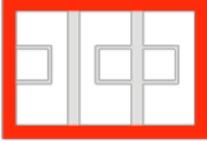
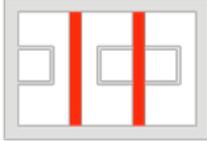
### Avantages et inconvénients selon l'usage vertical

REPLISSAGE	STRUCTURE	FINITION INTÉRIEURE	FINITION EXTÉRIEURE
			
+	+	+	+
Peu d'implication structurelle Mise en œuvre possible à couvert	Economie de la structure Simplicité Parti architectural fort Impact écologique positif important	Régulation hygrothermique Inertie Pas d'implication structurelle Visibilité & Esthétique Possibilité de panneaux radiants	Budget disponible Compétitivité Visibilité Esthétique
-	-	-	-
Détails du périmètre complexes Étanchéité difficile Pas d'économie structurelle Composer avec les entreprises Inadapté à certaines techniques	Portance limitée Acteurs frileux Composer avec les entreprises	Impact écologique positif faible Composer avec les plaquistes	Durabilité aux intempéries Épaisseur Aucun gain hygrothermique

### Avantages et inconvénients selon l'usage horizontal

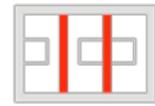
REPLISSAGE	STRUCTURE	FINITION INFÉRIEURE	FINITION SUPÉRIEURE
			
+	+	+	+
Peu de contraintes Faible coût	Impact écologique positif important	Pose aisée Peu de contraintes Acoustique	Esthétique
-	-	-	-
Surcharge	Portée très limitée ou arc/voûte	Surcoût	Durabilité Entretien

## Avantages et inconvénients selon l'élément

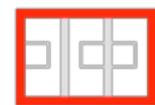
CLOISONS DISTRIBUTIVES	FAÇADES	PAROIS SÉPARATIVES	PLANCHERS
			
+	+	+	+
Régulation hygrothermique	Isolation acoustique	Isolation acoustique	Isolation acoustique
Inertie	Compétitivité	Régulation hygrothermique	Régulation hygrothermique
Peu d'implication structurelle		Inertie	Inertie
Peu de contraintes			
Possibilité de panneaux radiants			
-	-	-	-
Compétitivité	Non isolant thermique	Portance limitée	Portée limitée
Surcoût	Détails complexes	Épaisseur	Surcharge
Surcharge			

→ 8

REMPLISSAGE PAROIS SÉPARATIVES



FINITION EXTÉRIEURE FAÇADES



Les façades en pisé du groupe scolaire Miriam Makeba situé à Nanterre en Île-de-France se développent sur l'espace public. Certaines parois intérieures sont également réalisées en terre damée. Nous devons ce projet d'envergure à Toa architectes associés.

Photo - Frédéric Delangle







## Postface · constats, améliorations, perspectives

Les mutations en cours du secteur de la construction demandent un accompagnement des concepteurs par des spécialistes, techniciens et formateurs. Comment assister les maîtres d'œuvres dans la mise en place de stratégies pertinentes et durables d'intégration de terre crue dans leurs projets ? Quels éléments d'aide à la conception produire ? Ce travail constitue une ébauche de réponse à ces enjeux avec, tout d'abord, une synthèse des règles et opportunités associées aux constructions en terre crue et son illustration par des projets contemporains. Le document développe ensuite la question des stratégies d'intégration, nourries de l'apport théorique précédent mais aussi des expériences d'accompagnement dans le cadre du projet Cycle Terre.

Il est déjà possible de tirer divers enseignements du travail accompli, et de proposer des améliorations et des perspectives d'approfondissement dans l'optique de répondre au mieux aux besoins des maîtrises d'œuvre. Ce sujet très ambitieux reste à développer sur le long terme.

### Iconographie

Outre la nécessité d'obtenir l'accord de diffusion à titre gracieux de la part du maître d'œuvre et du photographe, la volonté de mettre en valeur des projets construits contemporains, idéalement urbains et français (ou que l'on peut sans mal imaginer en France) contraint fortement les choix iconographiques. La surabondance des projets contemporains construits en pisé est logiquement reflétée dans l'ouvrage. Or les choix iconographiques sont de grande importance dans la mesure où les images que l'on valorise sont forcément celles qui inspirent les architectes. Il nous faut donc rester vigilants à ne pas nourrir une dynamique qui favoriserait encore le pisé face aux autres techniques de construction en terre par ailleurs pleines de qualités. Ce point devra être travaillé avant la publication du guide Cycle Terre qui a pour objectif assumé la valorisation des produits de la fabrique (blocs, enduits, panneaux).

Par ailleurs, certaines illustrations montrent des mises en œuvre de terre stabilisée par des liants hydrauliques. C'est un point qui mérite également notre attention. Le texte invite à saisir pleinement les opportunités offertes par les matériaux à base de terre crue et à prendre en considération très tôt dans le processus de projet leurs spécificités qui engendrent des contraintes de mises en œuvre. L'objectif n'est certainement pas d'illustrer des réalisations allant à l'encontre de cette logique. Ainsi, l'intention a été de limiter l'iconographie à des mises en œuvre n'étant pas contradictoires à une mise en œuvre de terre non stabilisée. Cependant, certaines photographies choisies ne présentant pas de contradiction avec l'ambition du document en elles-mêmes montrent des bâtiments qui n'auraient par ailleurs pas pu être réalisés en terre crue non stabilisée. Le lecteur qui utiliserait

cette illustration pour trouver une référence architecturale pourrait alors être induit en erreur sur ce qu'il est réellement possible de faire avec cette matière première.

### Structuration des contenus

Un travail conséquent a été réalisé au niveau de la structuration des contenus. Le recueil illustré élaboré en début de travail *Spécificités de mise en œuvre* (pathologies et solutions constructives) était ordonné selon les facteurs de dégradation. Cette structuration me semble appropriée pour une formation car elle permet d'aborder chacun des phénomènes en profondeur et d'étendre sa logique à différents éléments constructifs. Elle ne répond cependant pas aux besoins de l'ouvrage écrit, tout d'abord parce que les maîtres d'œuvres sont plus intéressés par les solutions de mises en œuvre que par les phénomènes qui les sous-tendent. Structurer la majeure partie de l'ouvrage autour de la réponse aux risques semblait également présenter une perspective trop négative.

J'ai donc opté pour une présentation écrite de ce sujet en deux parties, selon deux logiques distinctes. La description succincte des facteurs de dégradation, afin d'en exposer les logiques applicables à tous les éléments du bâti est suivie d'une section qui détaille les dispositions constructives diverses pour chaque élément constructif. Ainsi, l'architecte intéressé par la conception d'un élément particulier orientera sa lecture sur un chapitre spécifique.

Quel que soit l'angle de présentation (les facteurs de dégradation ou les éléments constructifs), la volonté d'être exhaustif dans chacune des parties mène obligatoirement à des répétitions de contenus. En effet, les mêmes phénomènes se retrouvent dans divers éléments constructifs, et ces éléments regroupent toujours divers phénomènes. Si le lecteur assidu qui lira l'ouvrage d'une traite s'en plaindra, l'architecte intéressé par une option d'intégration spécifique pourra trouver toute l'information dont il a besoin au même endroit.

### Impact et communication

Marie Aeberli de la *Briqueterie d'Allone* me disait avec justesse que ce dont les maîtres d'œuvres ont besoin, c'est d'une synthèse succincte et simplissime des règles principales de construction en terre crue. Une feuille. On est loin du compte avec ces descriptions extensives des phénomènes, de leurs causes, de leurs conséquences et des moyens d'en tirer parti ou de les prévenir... J'espère que ce travail sera utile aux plus passionnés, aux plus déterminés. Pour ce qui est des autres, je pense effectivement qu'une planche illustrée synthétique des règles principales permettrait une communication efficace introductive lors de sollicitations d'architectes.

De la même manière, la réflexion menée sur les stratégies d'intégration est jusqu'ici très théorique. La démarche analytique

qui permet de décortiquer la question en profondeur n'est pas adaptée à une communication pratique dirigée vers des professionnels de la construction. Sur base du travail d'analyse réalisé il serait utile et plus démonstrateur de présenter quelques stratégies mises en place sur des projets construits : étudier les données et enjeux spécifiques du projet, exposer ce qui a motivé les acteurs à porter leur choix sur une option d'intégration plutôt qu'une autre et faire un bilan.

### Perspectives de développement

L'étude des stratégies d'intégration mériterait à mon avis d'être poursuivie et approfondie pour mieux répondre aux besoins des acteurs des projets. Il s'agirait tout d'abord de mieux étudier les données stratégiques intemporelles et conjoncturelles et les enjeux spécifiques aux projets, mais aussi d'en donner les implications concrètes sur les projets.

Si les caractéristiques techniques des matériaux sont développées dans ce travail, elles pourraient être davantage interprétées en regard des enjeux du projet. Les apports de l'intégration de terre crue pourraient notamment être mieux quantifiés. Quel est, par exemple, le gain réel en confort ou en énergie lorsqu'on remplace un matériau conventionnel par un matériau terre crue dans une option d'intégration spécifique ? Ce type d'analyse pourrait être réalisé sur des projets concrets, et illustrer de façon tangible les caractéristiques exposées théoriquement.

De la même manière, on vante les qualités environnementales des matériaux à base de terre crue. Concrètement, quelle quantité d'énergie et de gaz à effet de serre peut-on économiser sur une mise en œuvre spécifique ? Les FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire) en cours de réalisation constitueront un premier élément de réponse à ce questionnement. Il est cependant essentiel d'y porter un regard critique. En effet, la frontière arbitraire de limite de l'ACV (Analyse du Cycle de Vie) et les nombreuses hypothèses et scénarios réalisés influent fortement sur le résultat qui n'est en conséquence pas toujours aussi objectif qu'on le souhaiterait. Il faut également garder à l'esprit que ces fiches sont réalisées à un instant T, prenant en considération l'état actuel de développement de la filière. Or certains impacts importants comme le transport seront fortement diminués avec le développement et la multiplication des acteurs.

Les données conjoncturelles liées aux pratiques constructives et à la filière pourraient, elles aussi, être davantage explorées. D'un point de vue stratégique il est essentiel pour le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage de s'assurer que la main d'œuvre nécessaire est disponible, ou, éventuellement, prête à se former. Il serait donc utile d'établir une liste des entreprises et artisans qualifiés et de leurs compétences, en Ile-de-France mais aussi dans les autres régions si on élargit la réflexion. Cependant, gardons à l'esprit le cercle vicieux d'une telle approche : se limiter aux techniques pour lesquelles la main d'œuvre qualifiée

est abondante ne permettra jamais de soutenir la transition que nous amorçons. Dans une perspective de développement de filière, il serait également pertinent de questionner la volonté des entreprises conventionnelles de se former. Quelles sont leurs motivations et leurs freins au passage à la mise en œuvre de terre crue ?

La question du surcoût mériterait également une étude dédiée. En effet, cette donnée est prépondérante dans les choix stratégiques d'intégration. Des évaluations de coût et surcoût pour différentes stratégies sont essentielles pour orienter les choix des acteurs du projet, mais sont aussi très complexes car énormément de facteurs les influencent. A nouveau, l'analyse de projets construits peut permettre de répondre partiellement à ce besoin.

L'étude des options d'intégration de terre crue dans les planchers pourrait finalement être développée. Ces options aujourd'hui peu exploitées me semblent pourtant intéressantes. Bien-sûr, l'étude approfondie des systèmes constructifs possibles doit être réalisée avant de pouvoir en analyser les avantages et inconvénients avec pertinence.

#### Particularismes locaux

Je termine sur une note plus légère relative aux cultures locales. J'ai pu, avec amusement, constater quelques particularismes langagiers typiques de ma Belgique natale. Par exemple, nous appellerons volontiers *étançon* un étais vertical, *larmier* la goutte d'eau ou *gîte* la solive. Si ce vocabulaire n'est pas toujours erroné selon le Dicobat (mon plus grand allié durant la rédaction de ce mémoire), l'objectif est bien d'être comprise par le public cible de la publication. La relecture attentive de mes collègues et de mon directeur d'études m'a permis d'améliorer l'intelligibilité de mes propos. Cependant, je ne garantis pas l'absence de tournures de phrases ou de vocabulaire *exotiques*...

## Bibliographie

AFNOR, 2008a. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types. NF DTU n° 20.13 P1-1*. La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008b. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 1-2 : Critères généraux de choix des matériaux. NF DTU n° 20.13 P1-2*. La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008c. *Cloisons en maçonnerie de petits éléments. Partie 3 : Mémento. NF DTU n° 20.13 P3*. La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008d. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques types. NF DTU n° 20.1 P1-1*. La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008e. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 1-2 : Critères généraux de choix des matériaux. NF DTU n° 20.1 P1-2*. La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008f. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 3 : Guide pour le choix des types de murs de façades en fonction du site. NF DTU n° 20.1 P3*. La Plaine Saint Denis : AFNOR.

AFNOR, 2008g. *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs. Partie 4 : Règles de calcul et dispositions constructives minimales. NF DTU n° 20.1 P4*. La Plaine Saint Denis : AFNOR.

amàco, CLOQUET, Basile, BOULICOT, Léo, 2020. « Construire en terre crue aujourd'hui ». In : *MOOC bâtiment durable*. Villefontaine : amàco.

ANGER, Romain, BIOUL, Sophie, TRIC, Zoé, 2020. « Concevoir la matérialité : Les murs de maçonnerie agglomérée ». In : *Cours de licence*. Lyon : ENSAL.

ANTOINE, Anne-Lyse, CARNEVALE, Elisabetta, GENIS, Léa (dir), MISSE, Arnaud (dir), 2016. *Architectures contemporaines en terre crue en France de 1976 à 2015: Pourquoi et comment les acteurs construisent avec ce matériau aujourd'hui ?* Mémoire de DSA. Grenoble : ENSAG. 183 p.

ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, CTA, FFB, FÉDÉSCOP BTP, MPF, Réseau Ecobâtir, TERA, 2018. *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue* [en ligne]. [S.l.] : [s.n.]. 200 p. Disponible sur : < <https://www.asterre.org/les-guides-de-bonne-pratique/> > (consulté le 16 novembre 2020).

AsTerre, Ecologik, CRAterre, 2013. *Prix national 2013 de l'architecture en terre crue, 12e festival architectures de terre Matières à construire [Présentation détaillée des projets des participants]: dans le cadre du festival Grains d'Isère, du 29 mai au 02 juin, les Grands Ateliers*. Grenoble : CRAterre-ENSAG. 26 p.

AVONS-BARIOT, Julie, BARDAGOT, Anne-Monique (dir), 2016. *Au pied du mur: l'architecte expert du bâti ancien en pisé*. Mémoire de DSA. Grenoble : ENSAG. 190 p.

BEAUMIER, Jean-Louis, JANIN, Franck, 2017. *L'isolation thermique-acoustique : Solutions combinées écologiques - En neuf et en rénovation*. Mens : Terre Vivante. 221 p. Coll. Techniques de pro. ISBN 978-2-36098-278-3.

BOUTINARD, Emmanuel (coord), MISSE, Arnaud, CHAMODOT, Mathilde, CRETE, Eugénie, COTTALORDA, Julien, VERLAQUE, Pierre-Emmanuel, SCHMITT, Bernard, LACOSTE, Laurent, 2018. *Dossier technique lié à l'ATEX de type A n°2533 : mur en maçonnerie de BTC non porteur en enveloppe extérieure et/ou en remplissage d'une ossature porteuse*. Guyane : DEAL Guyane. 83 p.

CLAESSENS, Jacques, 2006. « Physique du bâtiment ». In : *Cours de licence*. Bruxelles : ISA Saint-Luc Bruxelles.

CLAESSENS, Jacques, 2009. « Equipements du bâtiment ». In : *Cours de licence*. Bruxelles : ISA Saint-Luc Bruxelles.

COIGNET, Laurent, COIGNET, Jean, 2003. *La maison ancienne : Construction, diagnostic, interventions*. Paris : Eyrolles. 148 p. Coll. Au pied du mur.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, MONTÉRÉMAL, Marion, MOREAU, Sylvain (dir), BOTTIN, Anne (réd en chef), 2017. « Entreprises du BTP : 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014 ». In : *Datalab*. mars 2017. 4 p.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, MOREAU, Sylvain (dir), BOTTIN, Anne (réd en chef), CHAUVET-PEYNARD, Axelle, MONTÉRÉMAL, Marion, 2018. « Le recyclage des déchets produits par l'activité de BTP en 2014 ». In : *Datalab*. octobre 2018. 51 p.

- CRAtterre, 2009. *Réduction de la vulnérabilité aux inondations des populations (et de leur cadre bâti) d'Afrique de l'Ouest et Centrale : Base du mur : Soubassement Gestion des abords*. Genève : FICR. 41 p.
- CRAtterre, 2010. *Réduction de la vulnérabilité aux inondations des populations (et de leur cadre bâti) d'Afrique de l'Ouest et Centrale : Base du mur : Déchaussement*. Genève : FICR. 23 p.
- CRAtterre, 2013. *Réduction de la vulnérabilité aux inondations des populations (et de leur cadre bâti) d'Afrique de l'Ouest et Centrale : Toiture*. Genève : FICR. 19 p.
- CRAtterre, [s.d.]. *Fiches techniques*. Grenoble : CRAtterre.
- CRAtterre - ENSAG, 2014. *Manuel de construction : La maçonnerie en terre crue. Stratégie de promotion de l'architecture en terre crue. Bureau Diocésain de Développement de Lubumbashi*. Lubumbashi : Bureau Salésien de Projets. 71 p.
- CRAtterre, HOUBEN, Hugo, DOAT, Patrice, GUILLAUD, Hubert, 1983. *Aide à la conception architecturale : Projet d'une Opération Expérimentale en Terre à Marrakech*. Paris : Rexcoop.
- CSTB, 1985. *Parois et murs en maçonnerie de petits éléments. Cahier des clauses techniques. DTU n° 20.1*. Paris : CSTB. ISBN 978-2-86891-038-7.
- CSTB, [s.d.]. « Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) ». In : *CSTB Évaluation* [en ligne]. Disponible sur : < <http://evaluation.cstb.fr/fr/appreciation-technique-expertise-atex/> > (consulté le 12 novembre 2020).
- DE VIGAN, Jean, CSTB (collab), 2006. *Dicobat 6*. Paris : Arcature. 1181 p. ISBN 2-9523608-2-0.
- Entreprise WIG france, [s.d.]. *Dossier technique lié à l'ATEX de type B : Construction de murs en béton de terre - maison des associations de la ville de Manom*. Toul : Entreprise WIG france. 71 p.
- FLOISSAC, Luc (dir), GARCIA, Coralie (dir), RFCP, 2018. *Règles professionnelles de construction en paille*. 3ème édition. France : Le Moniteur. 217 p. ISBN 978-2-281-14149-8.
- FONTAINE, Laetitia, ANGER, Romain, 2009. *Bâtir en terre : Du grain de sable à l'architecture*. Paris : Belin. 223 p. ISBN 978-2-7011-5204-2.
- GALMICHE, Véronique, 2019. *Construction et réhabilitation en terre crue : Points de vigilance*. Paris : République française. Ministère de l'Environnement, de l'Engie et de la Mer. 71 p.
- GAUZIN-MÜLLER, Dominique, 2016. *Architecture en terre d'aujourd'hui*. Paris : Museo amàco, CRAtterre. 112 p. ISBN 978-2-37375-009-6.
- GUILLAUD, Hubert, HOUBEN, Hugo, DETHIER, Jean, CRAtterre, 2006. *Traité de construction en terre*. 3ème édition. Marseille : Parenthèses. 355 p. ISBN 978-2-86364-161-3.
- HEITZ, Philippe, MOREL, Jean Claude, FABBRI, Antonin, SOUDANI, Lucile, CHAMPIRE, Florient, MEUNIER, Nicolas, 2015. *L'isolation du pisé : pertinence et principes*. Vaulx en Velin : ENTPE. 12 p.
- HERBERT, MRM, 1974. *Some observations on the behaviour of weather protective features on external walls*. Garston : Building Research Establishment - Department of the Environment. 17 p.
- HOUBEN, Hugo, [s.d.]. « Elements de conception ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.
- HOUBEN, Hugo, [s.d.]. « Protections de surface ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.
- HOUBEN, Hugo (gest), SCHNEEGANS, Guy (gest), CRAtterre, BELMANS, Dirk, DAYRE, Michel, DOAT, Patrice, GUILLAUD, Hubert, HOUBEN, Hugo, 1982. *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre : Travail de recherche et de réalisation, définissant les conditions de conception d'une architecture en terre, destiné aux concepteurs du village construit en terre dans la ville nouvelle de l'Isle d'Abeau (Isère)*. Grenoble : Ministère de l'urbanisme et du logement. Coll. Plan - construction.
- JUSSELME, Thomas, 2015. « Les caractéristiques thermiques de la terre : un frein ou une opportunité ? ». In : *Conférences et tables rondes de : L'option transversale matériaux innovants pour la construction durable*. Lyon : amàco & INSA Lyon.
- MAINI, Satprem, 2008. *Building with Arches, Vaults and Domes : Training Manual for Architects and Engineers*. Auroville : AV-BC.
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, 2017. « Energie dans les bâtiments ». In : *Bâtiments et règles de construction* [en ligne]. 8 juin 2017. Disponible sur : < <https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments> > (consulté le 15 septembre 2020).

- MISSE, Arnaud, 2019a. « Dimensionnement, élancement et stabilité ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.
- MISSE, Arnaud, 2019b. « Remplissage d'une ossature ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.
- MISSE, Arnaud, GASNIER, Hugo, LIETAR, Vincent, TESSIER, Dominique, BETOUX, Jacques, CHASTAGNOL, Jean-Marc, LALANNE, Marion, MUSTOIH, Mari, MOUSSA, Soulaïmana, MAANLI, Fayahuidine, DE LORIOL, Nathalie, LIÉTARD, Violaine, AIMÉ, Stéphane, CHARIFOU, Saïd, LIMOUSIN, Christophe, THURET, Christel, FAURE, Florian, VADON, David, PIRIOU, Michel, MAILLARD, Pascal, 2018. *Dossier technique lié à l'ATEX de type A n°2588 : Ouvrages en maçonnerie de BTC : Blocs de terre comprimée : Parois et murs*. Mayotte : ART.TERRE Mayotte. 100 p.
- MOEVUS, Mariette, FONTAINE, Laetitia, ANGER, Romain, DOAT, Patrice, 2013. *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) Rapport scientifique* [en ligne]. Grenoble : CRAterre-ENSAG. Disponible sur : < <http://archive.org/details/14909C2D2BetonArgileEnvironnementalFinal> > (consulté le 4 juillet 2019).
- MORISSET, Sébastien, 2019a. « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.
- MORISSET, Sébastien, 2019b. « Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.
- MORISSET, Sébastien, JOFFROY, Thierry, BEGUIN, Mathilde, GUILLAUD, Hubert, MISSE, Arnaud, POINTET, Martin, 2018. *Réhabiliter le pisé: vers des pratiques adaptées*. Arles : Actes Sud. 262 p. Coll. Beaux Arts. ISBN 978-2-330-09258-0.
- MORISSET, Sébastien, RIGASSI, Vincent, 2019. « Systèmes constructifs des architectures de terre ». In : *Cours de DSA*. Grenoble : ENSAG.
- OLIVA, Jean-Pierre, COURGEY, Samuel, 2010. *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en oeuvre: neuf et réhabilitation*. Nouvelle éd. revue et augmentée. Mens : Terre vivante. 255 p. Coll. Techniques de pro. ISBN 978-2-914717-88-5.
- PARMENTIER, B., ZARMATI, G., 2011. « Etats limites de service du béton armé : Partie 1 - Contrôle des flèches suivant l'Eurocode 2 ». In : *Les Dossiers du CSTC*. 11 août 2011. n° 4/2010-Cahier n°2, 13 p.
- PIN, Rémi, [s.d.]. « Bilan carbone du ciment : comment la filière veut changer la donne ». In : *Actu environnement* [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.actu-environnement.com/ae/news/Bilan-carbone-ciment-filiere-changer-33280.php4> > (consulté le 12 novembre 2020).
- PROCÈS, Michel, 2006. « Technologie de la construction ». In : *Cours de licence*. Bruxelles : ISA Saint Luc Bruxelles.
- RTS, 2009. Conrad Lutz, architecte EPFL : "avec un bâtiment vert, on a pu diviser l'énergie consommée par deux". [en ligne]. Berne : RTS, 3 décembre 2009. Disponible sur : < <https://www.lutz-architectes.ch/realisation/green-offices-premier-batiment-administratif-minergie-p-eco> > (consulté le 15 octobre 2020).
- UCL-LOCI, Architecture et Climat, BRANDERS, Aline, EVRARD, Arnaud, DE HERDE, André (dir), 2010. *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines : guide d'aide à la conception* [en ligne]. Namur : SPW DGO4. 94 p. Disponible sur : < [https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide\\_isolin\\_oct2010\\_web.pdf?ID=16005](https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide_isolin_oct2010_web.pdf?ID=16005) > (consulté le 15 janvier 2020).
- UCL-LOCI, Architecture et Climat, réalisé avec le soutien du SPW DGO4, *Energie +* [en ligne]. (2019, modifié le 19 octobre 2020). Disponible sur : < <http://www.energieplus-lesite.be> > (consulté le 20 janvier 2020).
- VISSAC, Aurelie, BOURGÈS, Ann, GANDREAU, David, ANGER, Romain, FONTAINE, Laetitia, 2017. *Argiles et biopolymères: les stabilisants naturels pour la construction en terre*. Villefontaine : CRAterre. ISBN 978-2-906901-93-3.
- VOLHARD, Franz, 2016. *Construire en terre allégée*. Arles : Actes Sud. 284 p.
- WIJNANTS, J., 2012. « Infofiche 60 : Fissuration des maçonneries non portantes ». In : *site CSTC* [en ligne]. mai 2012. Disponible sur : < <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infofiches&pag=60> > (consulté le 14 juillet 2019).
- ZIEGERT, Christof, 2008. « Terre et confort intérieur - l'équilibre ». In : *Premières assises nationales de la construction en terre*. Grenoble : AsTerre, Cluster Eco-Energies Rhône-Alpes, Chambre de Commerce et d'industrie de la Drôme, INEED-Néopolis, Alpexpo.

# Table des illustrations

## Couverture

Photo · amàco

## Introduction

1. Illustration · Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly, architectes
2. Illustration · Cycle Terre
3. Photo · amàco
4. Photo · amàco - Romain Anger
5. Photo · CRAterre
6. Photo · CRAterre
7. Photo · amàco - Sophie Bioul

## Caractéristiques techniques des matériaux

1. Installation artistique · amàco - Gian Franco Noriega et Zoé Tric  
Photo · amàco - Gian Franco Noriega et Zoé Tric
2. Illustration · CRAterre - Arnaud Misse  
Source · *Réhabiliter le pisé : vers des pratiques adaptées* (Moriset, Joffroy, Beguin, Guillaud, Misse, Pointet, 2018)
3. Graphique · amàco, sur base de données tirées de *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en œuvre* (Oliva, Courgey, 2010)
4. Photo · amàco
5. Photo · amàco - F. Barnier
6. Graphique · amàco, sur base de données tirées de *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : Rapport scientifique* (Moevus, Fontaine, Anger, Doat, 2013)
7. Graphique · amàco, sur base de *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Heitz, Morel, Fabri, Soudani, Champire, Meunier, 2015)
8. Photo · amàco
- 9-12. Graphique · amàco, sur base de données tirées de *Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) : Rapport scientifique* (Moevus, Fontaine, Anger, Doat, 2013)
13. Graphique · amàco
- 14-15. Photos · Julie Avons-Bariot  
Source · *Au pied du mur : l'architecte expert du bâti ancien en pisé*. (Avons-Bariot, Bardagot, 2016)
16. Photo · amàco

## Dispositions constructives

1. Maîtrise d'œuvre · nunc architectes  
Photo · Luc Boegly
2. Photo originale · Slaunger - Creative Commons CC BY-SA 3.0 - Photo recadrée par amàco
3. Photo · CRAterre - ENSAG
4. Maîtrise d'œuvre · Rosenbaum et Aleph Zero.  
Photo · Cristobal Palma
5. Photographie · ENSAG/INES/GAIA
6. Graphique · amàco, sur base de *L'isolation du pisé : pertinence et principes* (Heitz, Morel, Fabri, Soudani, Champire, Meunier, 2015)
7. Graphique · amàco, sur base de *Terre et confort intérieur* (Ziegert, 2008)
8. Photographie · ENSAG/INES/GAIA
9. Photo · Anne-Lyse Antoine & Elisabetta Carnevale, dans le cadre du *Projet Terres Contemporaines*
10. Photo · Paul-Emmanuel Loiret

- 11-12. Photos · CRAterre - Patrice Doat  
Source · «Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Moriset, 2019b)
13. Photo · Paul-Emmanuel Loiret
14. Photo · CRAterre - Sébastien Moriset  
Source · «Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Moriset, 2019b)
15. Photo · Léo Boulicot
16. Photo · Zoé Tric  
Source · *Concevoir la Matérialité : Les murs de maçonnerie agglomérée* (Anger, Bioul, Tric, 2020)
17. Photo · Romain Anger  
Source · *Concevoir la Matérialité : Les murs de maçonnerie agglomérée* (Anger, Bioul, Tric, 2020)
18. Photo · Léo Boulicot
19. Photos · Julie Avons-Bariot  
Source · *Au pied du mur : l'architecte expert du bâti ancien en pisé.* (Avons-Bariot, Bardagot, 2016)
20. Photos · CRAterre - Sébastien Moriset  
Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)
- 21-22. Photos · CRAterre - Sébastien Moriset  
Source · «Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Moriset, 2019b)
- 23-26. Illustrations · CRAterre - Arnaud Misse
27. Maîtrise d'œuvre · Boris Bouchet architectes  
Photo · Christophe Camus
28. Maîtrise d'œuvre · Mauricio sanchez et Juan Pablo Urbina  
Photo · Dario Angulo
29. Illustrations · amàco · Sophie Bioul, sur base du *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue* (ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et al., 2018)
30. Maîtrise d'œuvre · Eric Bousser  
Photo · CRAterre – Sébastien Moriset  
Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)
31. Maîtrise d'œuvre · haascookzemmrich Studio 2050  
Photo · Roland Halbe - [www.rolandhalbe.eu](http://www.rolandhalbe.eu)
32. Maîtrise d'œuvre · toa architectes associés  
Photo · Frédéric Delangle
33. Maîtrise d'œuvre · K'aDH (Espaces Libres), André Berthier, Joseph Frassanito  
Photo · Yann Letenier SCB - C. Malecot
34. Conception et réalisation · Etudiants du Master AE&CC de l'ENSA de Grenoble, 2013  
Photo · amàco – Romain Anger
35. Maîtrise d'œuvre · Eric Bousser  
Photo · CRAterre – Sébastien Moriset  
Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)
36. Maîtrise d'œuvre · Luigi Rosselli Architects  
Photo · Luigi Rosselli Architects - Edward Birch
37. Maîtrise d'œuvre · nunc architectes  
Photo · Communauté de Communes d'Alsace Bossue - Yvon Meyer
38. Photo · Martin Pointet
39. Maîtrise d'œuvre · Tectoniques architectes  
Photo · Tectoniques architectes / Renaud Araud photographe
40. Maîtrise d'œuvre · BOSC Architectes

- Photo · BOSC Architectes
41. Maîtrise d'œuvre · Ablinger, Vedral & Partner  
Photo · Dominique Gauzin-Müller
42. Maîtrise d'œuvre · haascookzemmrich Studio 2050  
Photo · Roland Halbe - [www.rolandhalbe.eu](http://www.rolandhalbe.eu)
43. Maîtrise d'œuvre · Thierry Bonne  
Photo · Philippe Dureuil
- 44-45. Maîtrise d'œuvre · nunc architectes  
Photo · Luc Boegly
46. Architecture · Atelier ALP  
Maîtrise d'œuvre · Ghislain Maëzt  
Photo · Sophie Bioul
- 47-48. Maîtrise d'œuvre · BC architects & studies  
Photos · Sophie Bioul
49. Maîtrise d'œuvre · :mlzd  
Photo · © Alexander Jaquemet
50. Maîtrise d'œuvre · Patricio Merino Mella  
Photo · Patricio Merino Mella
51. Architecture · Atelier ALP  
Photo · Pierre-Yves Brunaud
- 52-53. Maîtrise d'œuvre · Design & Architecture » - Miléna Stefanova et Bruno Marielle architectes  
Architecte associé · Vincent Rigassi  
Photos · Design & Architecture
54. Maîtrise d'œuvre · Edward Ng et Mu Jun  
Photo · Mu Jun
55. Ecole · Base Habitat, Kunst Universität Linz  
Etudiants · Sebastian Vilanek, Iris Nöbauer, Felix Ganzer  
Photo · Kurt Hörbst
56. Photo · Sophie Bioul
57. Illustration · amàco · Sophie Bioul
58. Maîtrise d'œuvre · Amateur Architecture Studio (Wang Shu et Lu Wenyu)  
Photo · © Edward Denison - [edenison@email.com](mailto:edenison@email.com)
59. Photo · ENSAG/ENSAL/GAIA
60. Architecte · Jean-Yves Barrier  
Photo · Marc Jeanaud
61. Maîtrise d'œuvre · Rosenbaum et Aleph Zero.  
Photo · Cristobal Palma
62. Maîtrise d'œuvre · © Lipsky+Rollet Architectes  
Photo · © Lipsky-Rollet architectes - Paul Raftery
63. Maîtrise d'œuvre · Maurer & Gilbert Architectes  
Photo · Michel Denancé
64. Maîtrise d'œuvre · Dario Angulo Architecte  
Photo · CRAterre-ENSAG
65. Illustration · amàco - Sophie Bioul, sur base du *Dossier technique lié à l'ATEx de type A n°2588* (Misse, Gasnier, Lietar, et al., 2018)
66. Illustration · amàco - Sophie Bioul, sur base du rapport de M. R. M. Herbert (Herbert, 1974)
67. Illustration · amàco - Sophie Bioul, sur base du cours de *Technologie de la construction* (Procès, 2006)

68. Image · amàco - Sophie Bioul
69. Photo · amàco
70. Maîtrise d'œuvre · Design & Architecture » - Miléna Stefanova et Bruno Marielle architectes  
Architectes associés · NAMA Architecture  
Photos · Paul Kozlowski - photoarchitecture.com
71. Maîtrise d'œuvre · Thierry Bonne  
Photo · Philippe Dureuil
72. Maîtrise d'œuvre · Design & Architecture » - Miléna Stefanova et Bruno Marielle architectes  
Architectes associés · NAMA Architecture  
Photos · Paul Kozlowski - photoarchitecture.com
73. Maîtrise d'œuvre · Maite Sainz de la Maza Ingénieur géologue · Macari de Torres Etude · Fetdeterra  
Photo · Fetdeterra
74. Photo · amàco
75. Illustration · amàco - Sophie Bioul
76. Maîtrise d'œuvre · Jorge Ramón Giacometti et Elena de Oleza Llobet  
Photo · Jerónimo Zúñiga
77. Maîtrise d'œuvre · nunc architectes  
Photo · Luc Boegly
78. Maîtrise d'œuvre · nunc architectes  
Illustration · nunc architectes
79. Illustration · amàco - Sophie Bioul, sur base des *Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre* (CRATERre, Houben, Belmans, Dayre, Doat, Guillaud, 1982)
80. Maîtrise d'œuvre · Design & Architecture » - Miléna Stefanova et Bruno Marielle architectes  
Architectes associés · NAMA Architecture  
Photo · Vincent Robin
81. Maîtrise d'œuvre · Sébastien Moriset et Nuria Sanchez Munoz du CRATERre  
Photo · CRATERre – Sébastien Moriset  
Source · « Patrimoine en terre : Pathologies et Diagnostic » (Moriset, 2019b)
82. Maîtrise d'œuvre · Boris Bouchet architecte.  
Photo · Christophe Camus
83. Maîtrise d'œuvre · *Reach & Scharff Architectes* et *Hors les murs Architecture*  
Photo · Kévin Dolmaire
84. Architecture · Eike Roswag-Klinge & Anna Herringer  
Photo · Kurt Hörbst
85. Photo · CRATERre – Sébastien Moriset  
Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Moriset, 2019a)
86. Maîtrise d'œuvre · Design & Architecture » - Miléna Stefanova et Bruno Marielle architectes  
Architecte associé · Vincent Rigassi  
Photos · Design & Architecture
87. Maîtrise d'œuvre : Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly, architectes  
Photo · Michel Denancé
88. Maîtrise d'œuvre · Ablinger, Vedral & Partner  
Photo · Dominique Gauzin-Müller
89. Maîtrise d'œuvre · Marcel Ruchon  
Photo · Anne-Lyse Antoine & Elisabetta Carnevale
90. Maîtrise d'œuvre · Kéré Architecture  
Photo · CRATERre – Sébastien Moriset

Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Mori-set, 2019a)

91-92. Photo · CRAterre

Source · « Détails constructifs : Structures en terre porteuse : monolithique et maçonnerie » (Mori-set, 2019a)

93. Conception et réalisation · CArPE

Photo · Noé Cauderay

### Stratégies d'intégration à l'échelle du bâti

1. Maîtrise d'œuvre · atelier Philippe Madec

Photo · © Pierre-Yves Brunaud

2-3. Schéma · Sophie Bioul

4. Maîtrise d'œuvre · Lutz architectes

Photo · C. Cuendet

5. Maîtrise d'œuvre · Clément Vergély architectes

Architectes associés · Diener & Diener Architekten, Michel Desvigne

Photo · Léo Boulicot

6. Maîtrise d'œuvre · Mil Lieux Architecture

Photo · Stéphane Girard

7. Maîtrise d'œuvre · Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly, architectes

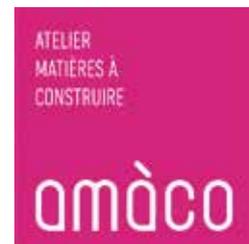
Photo · Paul-Emmanuel Loiret & Serge Joly, architectes - Paul-Emmanuel Loiret

8. Maîtrise d'œuvre · Toa architectes associés

Photo · Frédéric Delangle



Partenaires du projet Cycle Terre



Ils soutiennent le projet Cycle Terre



