



Prévenir les désordres,  
améliorer la qualité  
de la construction

PÔLE  
PRÉVENTION  
PRODUITS MIS  
EN ŒUVRE

Mars 2019

# CONSTRUCTION ET RÉHABILITATION EN TERRE CRUE: POINTS DE VIGILANCE



Crédit photo: @AQC

Cette étude a été réalisée par Madame Véronique Galmiche,  
architecte, expert près la cour d'appel de Nancy.

<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
<b>1. LES TECHNIQUES DE TERRE CRUE</b>	
<b>PORTEUSE</b>	<b>10</b>
1. 1 L'adobe, la brique de terre crue	11
1. 2 La bauge	17
1.3 Le pisé	23
<b>2. LES TECHNIQUES DE REMPLISSAGE</b>	
<b>ET DE DOUBLAGE</b>	<b>28</b>
2. 1 La terre-paille ou terre allégée	29
2. 2 Le torchis	33
<b>3. LES ENDUITS DE TERRE CRUE</b>	<b>37</b>
<b>4. CONCLUSION</b>	<b>44</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>47</b>
ANNEXE 1 : Tableau synthétique de présentation des différentes techniques de construction en terre crue	48
ANNEXE 2 : Tableau synoptique des désordres liés à l'humidité	50
ANNEXE 3 : Tableau synoptique des désordres structurels et constructifs	58
ANNEXE 4 : Tableau synoptique des désordres des enduits	62
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>68</b>

## AVANT-PROPOS

L'utilisation de la terre crue dans la construction est avérée partout dans le monde depuis des millénaires, la perpétuation de certaines traditions constructives est encore vivace dans de nombreuses régions et pays. Cependant, il semble qu'en France, une certaine désaffection se fasse sentir depuis le premier quart du XXème siècle et les débuts de l'industrialisation.

Néanmoins, certains professionnels perpétuent, voire remettent en pratique, les différentes techniques traditionnellement utilisées sur le territoire français, comme l'adobe, la bauge, le pisé, le torchis ou les enduits, tandis que d'autres s'attachent à développer des techniques plus récentes comme la terre allégée ou le bloc de terre compressée.

L'absence de Règles professionnelles formalisées ne permet pas aux professionnels de recourir à des textes de référence pour pratiquer ces différentes techniques de la terre crue.

Mise à part la transmission par l'exemple de règles de l'art orales, les techniques de construction ou de réhabilitation d'ouvrages en terre crue ne peuvent ainsi s'adosser à aucun texte déterminant. L'application des réglementations actuelles de la construction, telles que la Réglementation Thermique 2012 ou la Réglementation Parasismique applicable aux bâtiments ne permettent pratiquement pas l'utilisation de la terre crue seule, (non isolée, sans structure, non stabilisée) en mur extérieur porteur.

Depuis 2013, la DHUP a rassemblé les professionnels pratiquant les diverses techniques de la terre crue pour construire un référentiel des règles de bonne pratique.

La rédaction, en cours, de ces Guides de bonne pratique doit permettre :

- de remédier à ce manque de textes de référence ;
- de favoriser la préservation de l'important patrimoine bâti réparti sur tout le territoire ;
- de sortir les différentes techniques de la terre crue de la confidentialité dans laquelle elles se trouvent ; et ainsi de faciliter l'assurabilité des ouvrages.

La présente étude venant en appui de la rédaction de ces Guides de bonne pratique propose de situer les points d'attention sur lesquels il conviendra d'être vigilant.

Ce travail repose sur une quarantaine d'entretiens réalisés avec des professionnels, notamment entreprises et architectes spécialisés dans la construction et/ou la réhabilitation de bâtiments en terre crue. Ces entretiens recouvrent les différentes techniques pratiquées, les sinistres et désordres qui en ressortent sont issus d'observations, d'expériences de chantiers et de réalisations.

La lecture d'ouvrages, d'articles de référence et d'études spécialisées vient compléter le contenu. Il ne s'agit pas ici de réaliser une recherche scientifique qui s'appuierait sur des expériences de laboratoire, mais de faire un bilan de situation des difficultés rencontrées par les acteurs sur le terrain.

## INTRODUCTION

La terre est l'un des matériaux premiers utilisés par les hommes pour construire leurs abris ; la construction en terre crue a évolué au cours des siècles, les techniques se sont diversifiées suivant les époques et les régions. La terre crue constitue encore actuellement dans le monde, le matériau de base pour la réalisation d'une grande partie des habitations.

En France, le bâti en terre crue représente environ 15% de l'ensemble du patrimoine construit<sup>1</sup> ; "on estime à deux millions et demi le nombre de bâtiments construits en terre, encore existants en France"<sup>2</sup>. Différentes techniques sont présentes sur le territoire, elles sont adaptées aux ressources locales, à la qualité de la terre, aux conditions de réalisation ainsi qu'au site proprement dit ; dans une même région, les modes constructifs ruraux varient des modes constructifs urbains.

Cet immense patrimoine, un peu oublié aujourd'hui, est menacé, tant par la méconnaissance de son existence, que par le manque d'entretien des constructions, mais également par l'inadaptation à ce matériau des techniques de réhabilitation couramment mises en œuvre.

Le bâti neuf en terre crue n'est pas exempt de pathologie, en particulier vis à vis de la sensibilité à l'eau, néanmoins l'essentiel de la pathologie constatée concerne des interventions inadéquates sur les constructions existantes.

"La terre est un mélange d'argiles, de silts, de sables, de graviers et de cailloux, présents en différentes proportions. La terre durcit exclusivement par séchage à l'air et non par réaction chimique comme la chaux ou le ciment, et elle possède la propriété unique de redevenir plastique et malléable une fois remise en contact avec l'eau. Elle peut ainsi être réutilisée à l'infini tout en demeurant sensible à un excès d'infiltration d'eau."<sup>3</sup>

Suivant sa nature et ses qualités, la terre permet différents usages :

- en corps de mur : mur porteur et remplissage ;
- en mortier : utilisé en enduit et en hourdage de maçonnerie.

Elle se prête à différentes techniques développées à travers le territoire au cours de l'histoire et mises en œuvre encore aujourd'hui tant dans la construction neuve qu'en réhabilitation et restauration. On distingue deux grandes familles :

- les bâtiments dont les murs porteurs sont en terre crue monolithique ;
- les constructions dont les murs sont une ossature (bois) remplie de terre crue.

Ces deux familles se déclinent en plusieurs techniques. La terre est préparée et mise en œuvre selon différents modes :

- l'adobe (brique de terre crue) : terre + eau + fibres éventuellement, moulées et séchées puis maçonnées ;
- la bauge : terre + fibres + eau + sable éventuellement, montés à la main en levées successives ;
- le pisé : terre + eau, damées entre deux parois banchées ;
- la terre allégée ou terre-paille : terre + paille + eau, en remplissage de structure bois entre parois banchées, en doublage de murs existants ;
- le torchis : terre + fibres + eau, façonnage à la main pour remplissage et garnissage d'une structure bois ;
- les enduits de terre crue : terre + eau + éventuellement : chaux, fibres (chanvre, sciure, foin, lin, paille,..), préparation, façonnage et mise en œuvre à la main ou à la machine.

D'autres techniques se sont développées plus récemment, comme :

- le bloc de terre compressée (BTC) : terre + eau + sable + éventuellement ciment ou chaux, moulés et comprimés dans une presse de type manuel ou mécanique et/ou hydraulique puis maçonnée ;
- la brique extrudée : brique destinée à être cuite, sortie de la chaîne avant la cuisson, séchée puis maçonnée ;
- la terre coulée : terre + eau + chaux hydraulique éventuellement, coulée comme du béton de ciment entre des banches.

1. Hubert GUILLAUD - Construire en terre. Dans une démarche globale, ce matériau prouve toute sa pertinence - Les Cahiers Techniques du Bâtiment, n° 295 mars 2010.

2. Enduits sur supports composés de terre crue - Règles Professionnelles - ECOBATIR, LE MONITEUR, 2013 - p. 15.

3. Franz VOLHARD - Construire en terre allégée - ACTES SUD, avril 2016 - p. 11.

## La composition des terres et la teneur en eau

Les terres utilisées sont, en règle générale de préférence, celles du site de la construction, prélevées dans la couche située sous la terre végétale (environ 20 à 40 cm sous le niveau du sol), elles sont composées de :

- graviers et cailloux ;
- sables ;
- limons ;
- argiles.

La proportion de chaque composant varie en fonction des régions géologiques d'extraction.

Les terres se définissent suivant la proportion de chacun des constituants, elles peuvent être plus ou moins argileuses, d'un type d'argile plus ou moins cohésif, plus ou moins sableuses, plus ou moins limoneuses, les graviers de plus ou moins gros diamètre. Ces caractéristiques variables à l'infini suivant le secteur géographique, offrent des terres qu'il convient de qualifier à chaque opération, certaines terres sont plus adaptées à une technique qu'à une autre et ne conviennent que moyennement à un autre procédé.

La difficulté de caractérisation de la terre peut être un frein à l'utilisation de la terre crue, pourtant il existe des tests à réaliser sur site qui permettent de préciser les qualités de la terre : le retrait, la cohésion, ou de caractériser les ouvrages réalisés : entre autres la résistance mécanique. Le toucher, la vue, l'odeur peuvent également être des indicateurs pour un professionnel d'expérience.

Des tests sont également réalisables en laboratoire, ils sont cependant plus longs à mettre en œuvre et plus coûteux à obtenir. Ces tests en laboratoire spécialisé s'attachent à la granulométrie, à la plasticité, à la compressibilité.

Suivant les besoins et la qualité de la terre déterminée, il sera possible de modifier sa composition en ajoutant des sables ou graviers pour des terres trop argileuses, des stabilisants (végétaux ou minéraux) pour réduire le retrait au séchage, par exemple.

La terre se caractérise également par sa teneur en eau. La teneur en eau naturelle de la terre se situe aux alentours de 3%. Le centre de recherche CRATerre a décrit douze états hydriques de la terre, du conglomérat compact à la barbotine<sup>4</sup>. La teneur en eau de la terre varie suivant le mode opératoire choisi.

## La stabilisation

La stabilisation, qui modifie le comportement de la terre, est utilisée par un certain nombre de professionnels et pour diverses techniques : bauge, pisé, brique, terre allégée, .... Celle-ci peut s'avérer intéressante dans certaines circonstances. Cependant, l'utilisation de la terre n'implique pas obligatoirement la stabilisation.

"Ce terme qualifie l'opération qui consiste, par l'ajout d'un adjuvant, à rendre les mélanges contenant de la terre moins sensibles à l'eau, pour en limiter la dégradation."<sup>5</sup>

Les adjuvants sont de plusieurs types :

- ceux qui modifient la composition du matériau sans modifier son comportement physico-chimique ; ils permettent une meilleure liaison des composants de la terre entre eux, ils permettent également de compenser le manque ou l'excès d'un composant par rapport aux autres. Ces adjuvants peuvent être : des fibres végétales ou animales, des sables, des graviers, ... ;
- ceux qui modifient la composition du matériau en modifiant son comportement physico-chimique, ils interviennent au moment du séchage de la terre en apportant une réaction chimique de prise : chaux aérienne, chaux hydrauliques, ciments.

## La terre face à l'eau

Pour être façonnée, la terre nécessite un apport d'eau en plus ou moins grande quantité suivant la technique choisie. Une fois la terre mise en œuvre, sous quelle que forme que ce soit, brique, pisé, terre allégée, ... l'eau de gâchage doit être éliminée par séchage afin que les argiles contenues puissent jouer leur rôle de liant. Comme il est dit plus haut, "la terre durcit exclusivement par séchage à l'air ... elle possède la propriété unique de redevenir plastique et malléable une fois remise en contact avec l'eau."<sup>6</sup>

Si la terre redevient plastique et malléable au contact de l'eau, toute arrivée d'eau, sous quelle que forme que ce soit, sur un ouvrage en terre peut être source de désordre. Tout en étant un matériau solide et pérenne, la terre est un matériau sensible à l'eau et fragilisé par elle.

4. *Traité de construction en terre - CRATerre, 1989.*

5. *Enduits sur supports composés de terre crue - Règles Professionnelles - ECOBATIR, LE MONITEUR, 2013 - p. 39.*

6. *Franz VOLHARD - Construire en terre allégée - ACTES SUD, avril 2016 - p. 11.*

## Méconnaissance du matériau

La méconnaissance du matériau, de ses contraintes et ses qualités par la majorité des acteurs de la construction (maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, bureaux d'études, bureaux de contrôle, entreprises, utilisateurs, ...) est une des principales causes de désordres et de sinistres.

L'ignorance de la présence même de ce matériau terre pouvant constituer les murs, plafonds, cloisons tant de la part des occupants et/ou propriétaires, que de la part des entreprises et/ou maîtres d'œuvre qui interviennent sur le bâti est source de pratiques inadaptées et d'erreurs de prescription.

Les différentes techniques de mise en œuvre du matériau terre sont touchées par cette méconnaissance qui s'est progressivement installée au fur et à mesure de l'industrialisation de la construction, de la disparition des hommes et de leur savoir-faire engendrant l'extinction de la transmission.

Cette ignorance du matériau et de ses modalités de mise en œuvre, le désintérêt que suscite son apprentissage sont, entre autres, des causes du manque de formation des différents acteurs.

## Les filières

Un certain nombre d'organisations, des associations pour la plupart, existent et promeuvent l'utilisation de la terre crue dans la construction et la réhabilitation. Mises à part quelques associations plus spécialisées dans une technique précise, les autres organismes recensés sont plutôt généralistes :

- ARESO : dans le Sud-Ouest - concerne toutes les techniques ;
- AS TERRE : réseau national - regroupe les professionnels de toutes les techniques ;
- ATOUTERRE : en Midi-Pyrénées - touche toutes les techniques ;
- COLLECTIF DES TERREUX ARMORICAINS : en Bretagne - s'attache principalement à la bauge ;
- TERA : en Auvergne-Rhône-Alpes s'adresse essentiellement aux acteurs du pisé.
- ARPE : en Normandie - concerne toutes les techniques.

Cette liste n'est pas exhaustive, d'autres réseaux ou organismes nationaux ou régionaux valorisent également la construction en terre crue :

- ECOBÂTIR : Réseau de professionnels de la construction écologique ;
- CAPEB : Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment ;
- FFB : Fédération Française du Bâtiment ;
- MPF : Maisons Paysannes de France...

CRATerre, est un laboratoire de recherche et un centre d'enseignement rattaché à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble. Il s'intéresse à la construction en terre crue en général et au pisé en particulier.

L'ENTPE est une structure de recherche impliquée dans la construction en terre dont l'importante production scientifique est la plus ancienne à l'échelle nationale.

Malgré l'existence de ces différentes structures qui constituent des réseaux, il est difficile de parler de filières proprement dites, qui seraient constituées comme les filières bois par exemple ; cela tient-il au fait que la matière première utilisée est le plus souvent directement extraite du site et mise en œuvre par le professionnel avec peu de transformation ?

La répartition des professionnels sur le territoire est liée aux pratiques traditionnelles et historiques dans les différentes régions.

## La formation

### La formation initiale

Un DSA<sup>7</sup> "Architecture de Terre" est proposé par CRATerre à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble. C'est une formation post-master valorisée par un diplôme national de spécialisation et d'approfondissement, délivré par le ministère de la Culture et de la Communication.

### La formation continue

La Chaire UNESCO "Architectures de terre, cultures constructives et développement durable", pilotée par CRATerre-ENSAG<sup>8</sup>, vise l'amplification de la formation de formateurs, et à faciliter le développement de la recherche doctorale.

Des centres de formation spécialisés en éco-construction comme APLOMB, CANTERCEL, ECLIS, Le GABION, NORIA et Cie, OÏKOS, PASSERELLES, TIEZ BREIZ, ..., mais aussi des structures telles que BATIPOLE, le CAUE 32, EEAM9, les GRETA, l'IUMP, MFR<sup>10</sup> du Val d'Erdre, ..., proposent des

7. Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement.

8. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble.

formations de "maçon en éco-construction" ou d'"ouvrier spécialisé dans la restauration du patrimoine" avec des modules dédiés à différentes techniques, notamment le pisé, la terre-paille, le torchis, la bauge et l'enduit.

Des organismes tels que MPF, IFECO<sup>11</sup>, MFR du Val d'Erdre,... , offrent un certain nombre de formations courtes (2 à 10 jours), dédiées à l'éco-construction et à la réhabilitation, dont les programmes intègrent une partie traitant de la construction en terre crue (suivant les régions les techniques peuvent être différentes) et/ou des enduits terre.

Les chantiers participatifs ou les chantiers école sont également un moyen d'acquérir la pratique d'une technique particulière, ceux-ci étant disséminés dans le temps et dans l'espace, il n'est pas possible d'en évaluer l'impact.

## Organisation de l'étude

L'étude aborde six techniques de construction et réhabilitation en terre crue, elle est composée de trois grands chapitres correspondant à leurs usages :

- les techniques de terre crue porteuse : adobe/brique de terre crue, bauge, pisé ;
- les techniques de remplissage et de doublage : terre allégée, torchis ;
- les enduits de terre crue.

Les BTC, et les briques extrudées sont intégrées dans le chapitre "adobe - brique de terre crue".

Les désordres recensés dans ces six chapitres sont le fruit d'une part des entretiens menés avec les professionnels spécialistes des différents modes constructifs, et d'autre part de la lecture d'un certain nombre d'ouvrages, leur inventaire n'est sans doute pas exhaustif.

Un certain nombre de causes de désordres sont récurrentes et concernent toutes les techniques qu'elles soient porteuses ou de remplissage. D'autres désordres sont spécifiques à une technique donnée, leurs causes peuvent être de différentes natures.

Les informations contenues dans le paragraphe "Utilisation aujourd'hui", que l'on retrouve dans chaque chapitre, sont issues des mêmes sources que les désordres recensés ; elles offrent une idée du panorama d'emploi de la technique abordée et sans toutefois dresser un inventaire des différentes utilisations.

A la suite des six chapitres dédiés, un tableau synoptique récapitule l'ensemble des désordres recensés lors des interviews. Il se peut qu'une cause de désordre soit signalée dans une technique et pas dans une autre alors qu'il semblerait qu'elle puisse également lui être associée. Ce tableau pourrait servir de "pense bête" par rapport aux causes et sources de sinistres. En préambule de ce tableau synoptique, un tableau récapitule les caractéristiques des différentes techniques étudiées.

En règle générale, et quelle que soit la technique étudiée, les désordres et problèmes recensés peuvent se regrouper en deux familles :

- l'une de type humide ;
- l'autre de type structurel ou constructif.

Ces deux types de désordres seront étudiés pour chacune des techniques citées.

Un chapitre spécifique est réservé aux enduits de terre crue, appliqués sur tout type de supports ; on s'intéressera également aux enduits de toute nature appliqués sur les murs en terre crue.

Dans ce chapitre, il sera fait référence aux Règles Professionnelles " Enduits appliqués sur supports composés de terre crue" parues en 2013.

9. Ecole Européenne de l'Art et des Matières d'Albi.

10. Maison Familiale Rurale.

11. FEEO : Centre de formation construction durable et efficacité énergétique.

# 1. LES TECHNIQUES DE TERRE CRUE PORTEUSE

L'absence de Règles Professionnelles, de NF DTU, d'avis techniques ou d'autres textes de référence relatifs aux techniques de construction et de réhabilitation en terre crue, crée un vide pour les professionnels qui mettent en œuvre ces modes constructifs que sont la brique de terre crue, la bauge et le pisé.

Certains textes auxquels les professionnels doivent se référer pour la construction et la réhabilitation (NF DTU, Règlementation Thermique, ...) présentent des incompatibilités avec les caractéristiques et capacités physiques du matériau terre. La réglementation applicable au bâtiment, a des exigences qui ne sont pas adaptées au matériau "Terre crue", tant du point de vue de la construction neuve que de la réhabilitation. Ces distorsions induisent des situations critiques, notamment par exemple en matière de réhabilitation énergétique. Dans le cas de construction neuve, la réglementation parasismique peut, suivant les régions amener à mettre en œuvre des solutions inadaptées.

Des recherches scientifiques en cours ainsi qu'une série d'essais, devraient aider à la caractérisation et à la qualification des qualités intrinsèques de ce matériau ; en permettant une avancée des connaissances, l'utilisation de la terre crue pourrait aussi se développer par une meilleure conception en améliorant les conditions d'emploi.

## 1.1 L'ADOBE, LA BRIQUE DE TERRE CRUE



(Crédit photo : Cécile Monceaux)

La brique de terre crue est une technique de construction porteuse en appareillage maçonné extrêmement ancienne et très répandue dans le monde. Ces briques également appelées "adobes" ont servi à la réalisation de ce qui constitue aujourd'hui un immense patrimoine bâti en France.

### 1.1.1 La technique et la mise en œuvre

#### La formulation du matériau

- terre (sable et gravier fin éventuellement contenus) ;
- eau ;
- fibres, si la qualité de la terre le nécessite : paille hachée, aiguilles de pin, brindilles, soies de porc, ...

Les fibres peuvent représenter 10 à 20 kg/m<sup>3</sup> ou 30% du volume fini.

Une terre suffisamment sableuse ne nécessitera pas obligatoirement d'apport de fibres ; une terre très argileuse pourra être fibrée pour éviter une fissuration de retrait.

#### La technique de fabrication

La brique est réalisée à partir de terre moulée, séchée à l'air libre :

- la terre est émottée et tamisée, débarrassée des éléments végétaux puis hydratée de façon à obtenir une pâte molle à la limite de la boue ;
- le mélange préparé est mis au repos durant 48 heures environ, puis à nouveau malaxé et réhydraté ;
- l'incorporation de fibres nécessite un nouveau repos ;
- le moulage peut se faire à la main, par le jet vif du matériau dans le moule (cadre en bois), égalisation à la règle et démoulage ;
- le temps de séchage est d'environ 1 mois.

Le moulage peut se faire manuellement sans moule, la forme de la brique est alors plus irrégulière et plutôt en forme de cône, le moulage peut au contraire être mécanisé ; des presses manuelles ou mécaniques permettent une fabrication plus importante et plus rapide d'un produit plus résistant d'un point de vue mécanique. Le séchage reste cependant une période importante de la fabrication.

La technique de la découpe dans une masse de terre étalée au sol est aussi répertoriée ; celle-ci se fait à l'aide d'un fil tendu ou par l'intermédiaire d'une bêche sur un sol suffisamment dur, notamment sur les sols crayeux en Champagne.

Les dimensions des adobes et briques sont variables suivant les périodes et les sites de fabrication. Le format le plus courant au 19<sup>ème</sup> siècle : 38-42 x 28 x 4,9 cm ; des formats variant de 30 à 42 cm par 16 à 29 cm et 4,9 à 11,5 cm peuvent qualifiés de "fins", "épais" ou "compacts"<sup>12</sup>. Les formats actuels peuvent varier de 22 à 40 cm par 10 à 15 cm et 6 à 10 cm.

#### La mise en œuvre

Les briques sont maçonnées, dans la plupart des cas sur un soubassement en pierre, de préférence au mortier de terre pour leur bonne cohérence et l'uniformité de la paroi. Les façades exposées sont revêtues d'un enduit à la terre ou à la chaux. Les linteaux et encadrements de baies peuvent être en bois, brique de terre cuite ou pierre ; les chaînages horizontaux peuvent être en bois, les chaînages verticaux peuvent être en brique de terre cuite ou pierre.

L'épaisseur moyenne des murs varie de 30 à 50 cm, l'épaisseur des cloisons est comprise entre 5 et 15 cm. Arc, voûtes et coupoles sont également des mises en œuvre possibles des briques de terre crue.

12. Alain KLEIN - La construction en adobes, en Midi-Pyrénées (sud-ouest de la France). Fin XVII<sup>e</sup> - milieu XX<sup>e</sup> siècles - 2011

Les Règles de l'art et textes de référence :

- NF XP P13-901 Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception (AFNOR - octobre 2001).
- Règles professionnelles *Enduits sur supports composés de terre crue* (ECOBATIR, LE MONITEUR - 2013).

### Extension géographique de l'adobe et de la brique de terre crue

La technique de fabrication de ces petits éléments de construction la rend possible sur tout le territoire. La brique peut également venir en complément d'autres techniques de terre crue.

Le Sud-Ouest (Gascogne) est la principale région de développement de la brique de terre crue.

On peut cependant en trouver en Île de France et dans d'autres régions de tradition de construction en terre crue en complément des techniques locales.

### Utilisation aujourd'hui

Restauration du patrimoine, rénovation et entretien du bâti ancien, sont les principales utilisations de l'adobe. La brique de terre crue protégée par un enduit, une isolation ouverte à la diffusion de vapeur d'eau, un débord de toiture ou tout autre procédé est utilisée en murs extérieurs pour des maisons individuelles, petits équipements (sous condition de réponse aux exigences de la RT) ou pour des petits édifices non soumis à réglementation thermique.

La brique de terre crue non protégée est utilisée essentiellement en murs et cloisons intérieurs que ce soit dans des maisons individuelles ou pour des équipements.

## 1.1.2 Les acteurs - la filière

### Les acteurs de la filière

Comme il a été dit dans l'introduction, il n'existe pas, a priori, d'association ou d'organisation regroupant les professionnels spécialement liés à cette technique. Cependant, une filière "Brique de terre crue-adobe" est en voie de structuration ; l'association ATOUTERRE, en Midi-Pyrénées, principale région d'emploi de l'adobe, et As Terre, association nationale, proposent des annuaires de professionnels de la construction en terre crue sans distinction de technique, mais en distinguant les métiers : architectes, maçons, enduiseurs, bureaux d'étude, maître d'ouvrage, ...

### La formation

Les organismes repérés ne proposent pas de formation spécifique pour la brique de terre crue, mais des formations plus généralistes sur la construction, la rénovation ou la restauration de bâtiments ou d'éléments de bâtiment en terre crue.

### Essais, études et recherches

Le projet TERCRUSO rassemble les travaux de :

- Thanh TRAN : la caractérisation de la terre - LMDC, 2010.
- Déodonne KUNWUFINE : Les propriétés des matériaux de construction en terre crue - LMDC, 2011.
- Hugo CAGNON : Mesures des propriétés hygroscopiques des briques en terre crue pour la construction moderne et écologique en terre - LMDC, 2012.
- Jean-Emmanuel AUBERT : Rapport final du projet TERCRUSO - Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées - LMDC, avril 2013.

L'étude de Rémi DELINIERE qui fait partie du projet TERCRUSO s'attache plus particulièrement à la question des enduits (voir la référence de l'étude dans le chapitre 3 - Enduits de terre crue).

## 1.1.3 Les désordres recensés

### L'eau et l'humidité

Les problèmes liés à l'eau et à l'humidité peuvent être provoqués par différentes causes ou situations extérieures à la construction, fragilisant les murs en terre crue ; des interventions malvenues sur le bâtiment proprement dit ou de mauvaises mises en œuvre peuvent également engendrer des désordres.

### Pieds de murs humides, remontées capillaires et présence de salpêtre

Les interventions extérieures comme par exemple le rehaussement des sols extérieurs réduisent la hauteur des soubassements, amoindissant par là même la surface nécessaire à l'évaporation des remontées capillaires. Les rehausses successives des sols peuvent aller jusqu'à la disparition du soubassement et la mise en contact de la brique avec le sol environnant.

L'apparition de salpêtre est due aux sels contenus dans les remontées capillaires ; elle peut se produire de nombreuses années après la modification en cause, et ainsi révéler la présence d'humidité dans la paroi.

La réduction de la hauteur du soubassement restreint également la protection de la paroi face au rejaillissement des pluies, exposant ainsi le pied du mur en terre crue aux intempéries.

L'imperméabilisation des sols extérieurs renforce ces remontées capillaires ; la présence de trottoirs en béton de ciment, de voiries en enrobé de bitume, empêche l'évaporation des eaux météoriques, transformant les parois en mèches.

### Usure du mur

La présence de salpêtre sur la paroi d'un mur, notamment à l'intérieur d'un bâtiment abritant des animaux (ovins, bovins, caprins) peut favoriser son usure. En effet, les animaux attirés par les sels, auront tendance à lécher les murs, usant régulièrement le mur au même niveau et provoquant le creusement de la paroi qui s'amincit et peut à terme menacer ruine.

### Lessivage ponctuel de la terre, présence d'eau dans les parois

Le mauvais entretien des toitures et des zingueries, provoque des fuites de toutes sortes dans et sur les parois en terre crue entraînant l'usure et le lessivage de la terre des murs.

Le débord de toit large est nécessaire, surtout pour éviter les infiltrations en haut de murs, où une fuite se révélerait alors grave.

La présence de fuites en toiture peut amener à la détérioration des bois de charpente, modifiant la répartition des efforts sur les murs, créant ainsi un déséquilibre sur une paroi déjà fragilisée. Cette situation peut mener la construction à l'effondrement.

### Érosion superficielle et fonte des briques sur les parois exposées

Les pluies portées par les vents dominants s'abattent et ruissellent sur les murs exposés non protégés, emportant avec elles, quelques particules de terre et réduisant peu à peu l'épaisseur des parties exposées. L'eau aura moins tendance à entrer dans l'épaisseur du mur de terre massive (bauge, pisé), ce qui n'est pas le cas pour les murs d'adobes qui subissent des infiltrations entre les éléments.

Cette situation est d'autant aggravée que les briques sont maçonnées avec un mortier d'une nature différente, comme de la chaux ou du ciment. L'effet de fonte du matériau tendre (la terre crue) aura tendance à s'accroître. L'utilisation d'un mortier de même nature que la brique permet de pallier ce type de désordre.



(Crédit photo : Cécile Monceaux)



Bâtiment industriel du XIX<sup>ème</sup> siècle (Tarn), construit en adobes et briques foraines hourdées à la terre. Une ouverture a été reprise avec un mortier de chaux/ciment. On observe la différence de fonte (due au rejaillissement des eaux de pluie sur la corniche) des adobes hourdées avec un mortier de chaux/ciment, dont le joint reste saillant, par rapport à celles hourdées à la terre.

(Crédit photo : Cécile Monceaux)

### Humidité des murs

Les réhabilitations et rénovations inadaptées peuvent provoquer des apports d'humidité importants et dommageables pour les parois en briques de terre crue. La conjonction de plusieurs éléments comme : la création de dallages étanches (béton de ciment) au rez-de-chaussée, la mise en œuvre d'isolant ne permettant pas le transfert de vapeur d'eau dans les parois, la réparation de parties de murs avec des matériaux hétéroclites n'ayant pas les mêmes propriétés de transfert de vapeur d'eau, modifient l'équilibre hygrométrique du mur et peuvent à long terme mener à des désordres plus importants que la présence de moisissures, notamment l'effondrement partiel ou total de la construction.

### Désordres structurels

Comme toutes les techniques porteuses de construction en terre crue, l'adobe ou brique de terre crue travaille très bien en compression - en milieu sec, mais supporte mal la traction, la poussée et l'arrachement - aggravés en milieu humide.

### Écartement des murs et fissuration

L'aménagement des combles, entraîne bien souvent la modification de la charpente, suivant les pièces de charpente qui sont supprimées ou modifiées, les désordres engendrés peuvent être différents. Le vieillissement et le mauvais entretien de la charpente peuvent aussi être sources d'apparition de fissures d'écartement des murs :

- la poussée latérale due à la suppression d'entrait provoque l'écartement des murs, avec fissuration des angles ;
- le défaut ou la faiblesse du harpage d'angle des murs, désordre pouvant mener à l'ouverture des angles ;
- le poinçonnement provoqué par la modification de la répartition des charges de charpente et d'occupation (plancher) peut provoquer une fissuration verticale ;
- la modification des descentes de charges (surcharges d'occupation) peut provoquer le bombement des murs et l'apparition de fissuration.

### Fissuration verticale

Plusieurs causes sont à l'origine de la fissuration verticale des parois en brique de terre crue :

- les tassements différentiels résultant du creusement en sous-œuvre, de la modification de la portance des sols, de la transformation des abords de la construction ;
- la mauvaise mise en œuvre d'origine : fondations insuffisantes, murs trop élancés ;
- l'ouverture de baies trop grandes ou mal situées ;
- les fondations et dalles rigides en support de murs de terre crue plus "souples", réactions différentes aux contraintes de mouvement...

### Déchaussement des briques

Le montage des briques de terre crue doit se faire avec un mortier de terre crue, l'emploi de mortier de chaux ou de ciment provoque une fissuration de la paroi, les deux matériaux répondant à des contraintes de mouvement différentes. Outre le fait que les briques peuvent fondre plus facilement aux intempéries, la micro fissuration créée à l'interface brique/mortier, favorise la pénétration de l'eau dans la paroi, pouvant mener au déchaussement des briques.

### Tassement de la paroi

L'exécution trop rapide des maçonneries ne laissant pas le temps de séchage régulier et suffisant de la terre, entraîne le tassement de la paroi, si c'est une cloison, un vide se crée entre le plafond et la cloison.

## 1.1.4 Conclusion sur la technique de l'adobe et brique de terre crue

Nombre des désordres recensés sont dus à des causes extérieures à la brique de terre crue proprement dite, comme le mauvais entretien des constructions ou l'emploi de matériaux inadaptés en réhabilitation. L'ignorance de la présence du matériau terre constituant les parois, ainsi que la méconnaissance des caractéristiques de ce matériau, tant pour les projets de réhabilitation que pour les aménagements extérieurs sont bien souvent à l'origine de ces désordres.

Par exemple, les briques de terre crue ou adobes, nécessitent l'utilisation de mortier de même nature, or par méconnaissance, les maçonneries sont souvent dressées au mortier de chaux (hydraulique) ou de ciment. Ces mortiers plus rigides ne permettent pas une bonne homogénéité de la paroi ; d'une part cela favorise l'usure des zones les plus tendres (les briques) et d'autre part cela rigidifie le mur entraînant une fissuration.

La brique de terre crue ou adobe est principalement utilisée en restauration, en réhabilitation et en construction neuve d'ouvrages intérieurs. Si elle est utilisée en murs porteurs extérieurs, l'isolation par l'extérieur permettra d'une part de répondre à la réglementation thermique et d'autre part de protéger les murs des intempéries.

L'évolution contemporaine de la brique de terre crue se traduit par l'emploi, entre autres, de deux produits de fabrication industrielle ou semi-industrielle apparus dans le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle :

- le BTC (bloc de terre compressée) ;
- la brique extrudée.

Leur utilisation est principalement relevée pour des ouvrages intérieurs non porteurs.

**Nous vous invitons à consulter les *Guides de bonnes pratiques de la brique de terre crue*.**

### 1.1.5 Le BTC - Bloc de Terre Compressée

Le BTC est un produit récent, il est calibré et la plupart du temps stabilisé sauf demande spécifique au briquetier.

Il peut être fait référence à la norme XP P13-901 Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception (AFNOR - octobre 2001).

#### Fabrication et mise en œuvre

Le mélange, terre (argilo-sableuse) et chaux ou ciment (6 à 8 % du poids sec), est compacté dans une presse<sup>13</sup>. Les BTC sont montés avec un mortier de même nature ou un mortier de chaux hydraulique de préférence au ciment. La maçonnerie peut être porteuse.

Au sortir de la presse, le bloc subit une cure de séchage. Du bon déroulement de celle-ci dépend la qualité du bloc. Un mauvais traitement de cure peut entraîner :

- un produit friable ;
- une faible résistance mécanique

Avec de la chaux aérienne la prise est longue et difficile, avec du ciment le résultat s'apparente à un béton maigre.

#### Domaine d'emploi

Les BTC sont rarement employés en mur porteur extérieur, mais plutôt réservés à des ouvrages intérieurs tels que murs de refend, murs de masse, murs chauffants, cloisons, ..., ils sont donc préservés du gel et des contraintes liées à cette utilisation.

#### Essais, études et recherches

P'KLA Abalo - Caractérisation en compression simple des Blocs de Terre Comprimée (BTC) : application aux maçonneries "BTC-mortier de terre". Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2002.

Certains fabricants ont réalisé et fait réaliser une série d'essais portant sur : la résistance à la compression, résistance à l'abrasion, la conductivité et la capacité thermique, l'absorption par capillarité, la diffusion de vapeur d'eau. Un essai au feu (par le laboratoire Efectis à Metz) a montré un degré coupe-feu de 1 heure ; l'essai ayant été prolongé une heure supplémentaire, la charge

admissible en fin de feu était encore multipliée par dix par rapport à celle requise. L'humidité contenue dans le matériau atténue l'effet du feu. La brique cuit en quelque sorte, mais pas à cœur.

#### Désordres recensés

Les désordres proviennent essentiellement d'une utilisation inadaptée et/ou d'une mauvaise mise en œuvre :

- des conditions d'humidité importante (mauvaise saison de mise en œuvre, ventilation inégale des volumes construits, ...) sont facteurs d'un mauvais séchage pouvant entraîner l'affaissement d'une partie de l'ouvrage ;
- la mise en œuvre de briques insuffisamment sèches provoque un retrait de la brique avec fissuration ;
- la mise en œuvre trop rapide ne permet pas le séchage correct des joints en pied de mur ou de cloison, ce qui peut occasionner un tassement de l'ensemble de l'ouvrage, créant ainsi un vide entre la paroi en BTC et le plafond ou entre les deux derniers rangs de brique, le dernier restant collé au plafond ;
- le manque d'humidification du support entraîne une mauvaise adhérence entre brique et mortier ;
- l'inadaptation de la nature du sol de pose ;
- la présence d'un chaînage périphérique en béton de ciment n'est pas toujours une solution adaptée, voire peut provoquer des contraintes différentielles et de la fissuration ;
- la micro fissuration au droit des allèges de fenêtres due à la faible résistance du matériau à la traction et à sa grande rigidité.

Pour rester apparents en mur extérieur de bâtiments publics, les BTC doivent passer un test de gel/dégel. Il semblerait toutefois que les tests imposés ne soient pas adaptés au matériau<sup>14</sup>.



Mur construit en blocs de terre compressée.  
(Crédit photo : Étienne Gay)

13. Presse manuelle : simple - rendement 200 à 300 blocs par jour pour une équipe de 3 opérateurs - Fonctionnement : action d'un levier qui pousse un piston pour compacter une dose de matériau dans un moule. Presse mécanique ou hydraulique : plus puissante, elle intègre souvent le traitement du matériau comme le malaxage et le dosage - production jusqu'à 2 000 blocs par jour.

14. Le protocole prévoit la saturation en eau du bloc et l'application de cycles de gel/dégel, ce qui donne un résultat non concluant. Cependant, il convient de noter qu'après fabrication, les blocs ne reprendront jamais un tel niveau d'humidité, sauf à être mal mis en œuvre (pieds dans l'eau ou à même le sol) ou à ce que la maçonnerie ne soit pas correctement sèche à l'entrée de l'hiver.

## 1.1.6 La brique extrudée

### Fabrication

La brique extrudée est une brique destinée à être cuite, elle est sortie de la chaîne de fabrication avant cuisson.

En général la terre utilisée est fortement argileuse.

### Domaine d'emploi

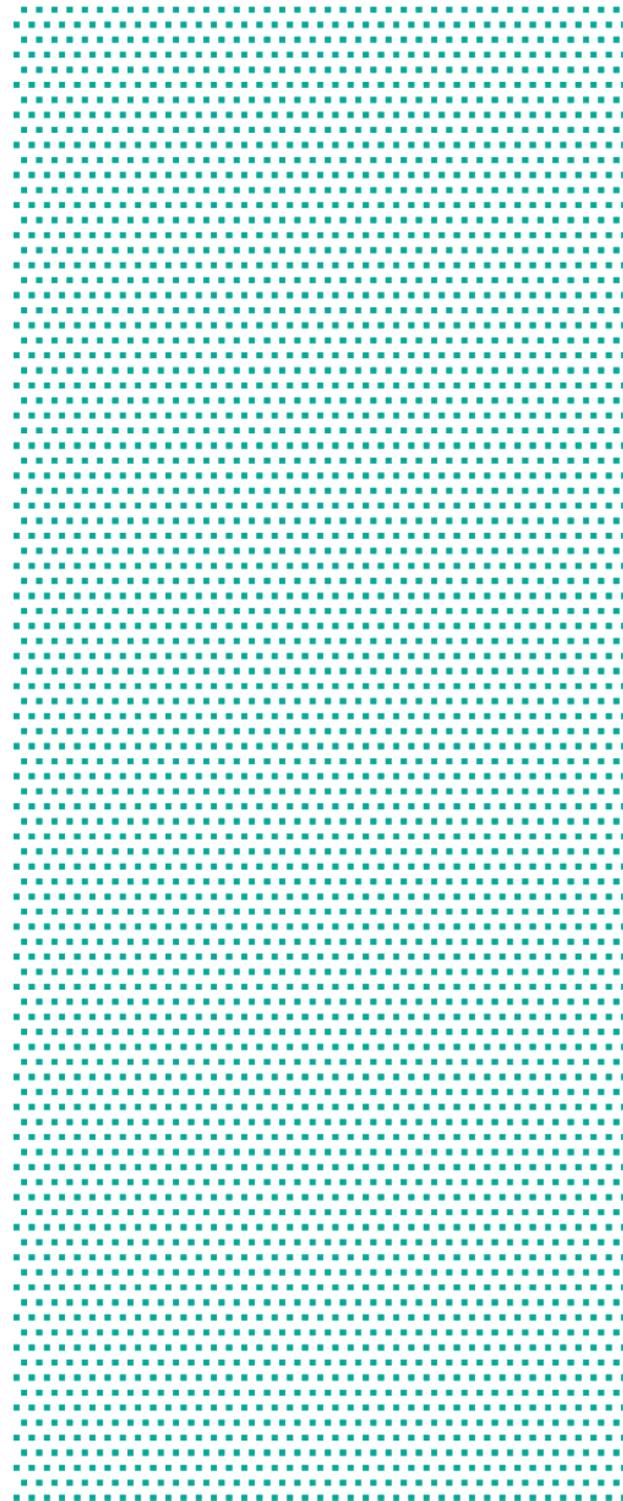
Ce produit est essentiellement utilisé en cloisons et murs intérieurs non porteurs.

### Essais, études et recherches

Des travaux de recherche sur des briques crues extrudées porteuses, sont actuellement en cours.

### Désordres recensés

De par leur fabrication, ces briques sont particulièrement sensibles à l'eau, il conviendra de suivre les instructions du fabricant pour leur mise en œuvre, une trop forte humidification pouvant faire gonfler le produit<sup>15</sup>.



15. Franz VOLHARD - Construire en terre allégée - ACTES SUD, avril 2016 - p. 194.

## 1.2 LA BAUGE



(Crédit photo : Benoit Leurent)

La bauge est une technique ancienne de construction porteuse monolithique qui se rencontre essentiellement dans l'ouest de la France. Technique souvent "cachée" sous un enduit, elle peut être facilement confondue avec le pisé.

### 1.2.1 - La technique et la mise en œuvre

#### La formulation du matériau

- terre ;
- fibres végétales ou animales : paille de blé, d'orge ou d'avoine, roseau, bruyère, crin, ... ;
- eau (de 20 à 35 %) ;
- sable éventuellement suivant la qualité de la terre.

La terre à bauge idéale est un mélange qui pourrait se composer de :

- gravier 33 % ;
- sable 33 % ;
- argiles et limons 33 %.

#### La technique de fabrication

Pour la mise en œuvre de la bauge, la terre est préparée :

- épierrée et émottée, elle est étalée sur une épaisseur d'une vingtaine de centimètres ;
- elle est ensuite mouillée et malaxée pour obtenir une pâte molle ;
- elle est alors recouverte de fibres, à nouveau malaxée et laissée au repos ;
- le mélange de consistance plastique est mis en œuvre par entassement.

#### La mise en œuvre

Le montage de la bauge s'effectue sur un soubassement en pierres ou briques (hauteur de 0,50 à 1,00 m) maçonnées à la chaux ou à la terre. Les levées successives d'une hauteur de 60 cm environ, sur toute la périphérie du bâtiment, sont réalisées à la fourche ou à la main, aplaties à la pelle ou piétinées pour un bon liage.

Le temps de séchage entre deux levées est d'une à quatre semaines. Les parois sont ensuite dressées à l'aide d'un paroir ou d'une houe afin de rectifier la planéité du parement.

En cas de pluie pendant le montage des levées, la mise en place d'une protection est souhaitable.

Suivant les secteurs géographiques, les murs sont revêtus d'un enduit à la terre ou à la chaux et d'un badigeon (qui doit être régulièrement entretenu).

Variantes de mise en œuvre :

- intercalation de fins lits de terre et de fibres ;
- découpage de pains de terre et assemblage collé grâce à l'eau contenue ;
- disposition de lits de fibres ou tessons de terre cuite entre les levées pour une meilleure cohésion.

En Haute-Normandie, la bauge est employée en remplissage entre poteaux de briques de terre cuite ou de bois.

L'épaisseur des murs est comprise entre 50 et 80 cm, avec en général un fruit.

Les Règles de l'art :

Règles professionnelles *Enduits sur support composés de terre crue* (ECOBATIR, LE MONITEUR - 2013).

### Extension géographique de la bauge

Les deux principaux bassins sont la Basse Normandie et la Bretagne. On rencontre la bauge en Haute Normandie principalement pour des clôtures et des dépendances agricoles (assez peu d'habitations).

Les départements de l'Oise et de la Somme comptent également parmi les secteurs de construction en bauge, ainsi que dans l'ouest de la France, les Pays de Loire, le Poitou-Charentes, la Vendée, où l'on recense des constructions en bauge.

En Midi-Pyrénées, la Haute Garonne, le Gers, le Tarn et le Tarn et Garonne sont représentatifs dans la tradition de cette technique constructive.

Tout à fait au sud, la Camargue fait également partie des régions de bauge.

### Utilisation aujourd'hui

La bauge est une technique relativement peu utilisée aujourd'hui en construction neuve. Les opérations pour lesquelles la bauge est mise en œuvre sont la plupart du temps des opérations de réhabilitation ou de restauration.

Les bâtiments réhabilités sont principalement des édifices traditionnels agricoles, corps de fermes, granges, petites dépendances, murs de clôture, ... Certains bâtiments sont aménagés en gîtes ruraux ou écomusées. En construction neuve, sont recensées quelques maisons individuelles, la façade sud d'un immeuble de logements dans la banlieue de Rennes<sup>16</sup>.

D'autres réalisations neuves concernent des murs intérieurs. Les conditions de vie en œuvre de ces ouvrages protégés sont alors libérées des questions liées aux intempéries et à la réglementation, notamment thermique qui ne s'applique pas à ces cas.

En effet, il s'avère quasiment impossible de construire en bauge seule en respectant les exigences de la RT 2012.

## 1.2.2 Les acteurs - la filière

### Les acteurs de la filière

Outre les associations généralistes dont il est question dans l'introduction, le Collectif des Terreux Armoriciens, plus particulièrement tourné vers la bauge, a pour objectif de promouvoir les systèmes constructifs qui ont recours à la terre crue, il regroupe des artisans, maîtres d'œuvre, architectes et formateurs de Bretagne, Normandie et Pays de Loire.

### La formation

L'association TIEZ BREIZ, en Bretagne propose une formation en deux jours dédiée à la bauge et au torchis. Le centre de formation "De la matière à l'ouvrage" proposait en 2015 une formation en 10 jours "Construire un mur porteur en terre", toutes techniques dont la bauge.

### Essais, études et recherches

Différents types de travaux de recherche ont été signalés :

- Recherche sur la modélisation thermique de la terre notamment en façade sud ;
- Thèse en cours à l'ESITC à Caen sur la caractérisation de la bauge (fonctionnement hydrique et thermique) ;
- Recherches IFSTTAR : *Développement d'un protocole d'essai sur chantier de caractérisation de la terre (résistance mécanique)* - Étude des techniques anciennes, analyse des procédés, pour adaptation à l'utilisation contemporaine.

## 1.2.3 Les désordres recensés

### L'eau et l'humidité

Certains aménagements ou interventions à l'extérieur des constructions peuvent favoriser, voire provoquer le développement de pathologies humides, comme des remontées capillaires et l'humidité des parois :

- la rehausse du niveau du sol ;
- le mauvais drainage des abords ; l'imperméabilisation des sols : chaussées, trottoirs ;
- la création de fossés, inversion des pentes d'écoulement ;
- la plantation d'arbres et d'arbustes trop proche des murs ;
- les mouvements naturels de terrain (argiles gonflantes, ...),

Ces interventions peuvent aussi aggraver des désordres liés à des interventions sur et dans le bâtiment.

### Remontées capillaires, cristallisation des sels (sal- pêtre)

La majeure partie des remontées capillaires est due à un défaut concernant le soubassement de la construction :

- l'absence de soubassement, mettant la bauge directement en contact avec le sol - l'effet de mèche est alors optimal ;

16. Résidence Salvatierra - 2001 - 40 logements collectifs à R + 5. La façade sud est constituée de blocs de bauge composée d'argile, de paille d'orge et de ciment. [http://www.reseau-breton-batiment-durable.fr/retour\\_experience/residence-salvatierra](http://www.reseau-breton-batiment-durable.fr/retour_experience/residence-salvatierra).

- la hauteur insuffisante, le soubassement sert de zone d'évaporation de l'eau du sol avant son passage dans la paroi en bauge - un soubassement trop bas ne permet pas la bonne évacuation de l'eau capillaire. Le soubassement sert également de protection contre le rejaillissement des eaux de pluie ou la neige, une moindre hauteur anéantit ce rôle ;
- les modifications de l'environnement proche du mur et notamment de rehausses qui réduisent la hauteur protectrice du soubassement ;
- le mauvais entretien ;
- l'oubli, en construction neuve, de la membrane de coupure de capillarité.

Outre les interventions extérieures citées ci-dessus et les défauts du soubassement, d'autres causes encore sont facteurs de remontées capillaires :

- l'absence de descentes d'eau ;
- la réalisation de dallages en béton de ciment avec films étanches ;



Dégradation de la bauge à la limite du soubassement et perforation des parois par des insectes et petits rongeurs.  
(Crédit photo : Robert Junalik)



Dégradation du matériau sous débord de toiture et désolidarisation des murs.  
(Crédit photo : Robert Junalik)

- la mise en œuvre de revêtements de murs étanches à la vapeur d'eau (voir aussi chapitre 3 : Les enduits de terre crue).

#### Dégradation du mur en bauge à la limite du soubassement

L'humidité anormale dans un mur en terre peut amener à sa ruine. L'humidité présente à cet endroit fragilise le mur. Cette situation peut être aggravée par la présence d'animaux qui, attirés par les sels contenus dans l'eau capillaire, lèchent les murs, usant ainsi la paroi, toujours à la même hauteur.

#### Dégradation sous débord de toiture du mur goutte-reau

Le débord de toiture est trop court, son rôle protecteur par rapport aux pluies et intempéries est insuffisant. Dans certaines régions, les toitures en chaume présentant un fort débord ont été remplacées (depuis une centaine d'années) par des toitures en tuiles avec un débord de moindre importance ; Les murs n'étant plus totalement protégés contre les intempéries par ces grands débords, les enduits sont apparus petit à petit (voir chapitre 3 : Les enduits de terre crue).

Dans la construction neuve, la faiblesse des débords de toiture peut activer l'apparition de lichens en partie haute de la paroi.

#### Érosion superficielle de la bauge due aux intempéries

Le manque d'entretien des toitures et des zingueries représente autant de points néfastes à la bonne conservation des murs en bauge, tout comme le manque d'entretien sur le long terme des parois extérieures, voire l'abandon des bâtiments, engendre des désordres pouvant mener à la ruine de l'édifice.



Fonte de la bauge d'un mur non protégé : pas de débord de toiture et absence de zinguerie  
(Crédit photo : Robert Junalik)



Humidité dans l'angle de la construction due à l'absence de descente d'eau

(Crédit photo : Robert Junalik)

Les murs protégés par un enduit pelliculaire à la terre ou à la chaux doivent être régulièrement regarnis, l'érosion (les turbulences du vent) ayant tendance à accentuer les fissures, petites cavités et inégalités de la paroi. Les surfaces exposées aux vents dominants et aux intempéries doivent être protégées et entretenues. Le manque d'entretien peut également mener à l'infiltration des eaux de pluie entre la paroi et les enduits, créant ainsi un désordre et une dégradation invisible du mur.

### Humidité des parois

La réhabilitation des bâtiments, réalisée dans l'ignorance des spécificités comportementales de la bauge, et de la terre crue en général, est créatrice d'humidité dans les parois et dans l'habitation, là où avant réhabilitation le bâti était sain. Les causes sont multiples, les plus importantes étant :

- la création de dallages en béton de ciment avec film étanche ;
- l'étanchéité des abords (voiries, trottoirs) ;
- la mise en œuvre de doublages isolants et/ou parements imperméables à la vapeur d'eau ;
- l'absence ou insuffisance de ventilation ;
- les enduits inadaptés (voir chapitre 3 : les enduits de terre crue).

### Pourrissement des abouts de solives et poutres de planchers

Les remontées capillaires peuvent être "guidées"

jusqu'au plancher du premier étage, voire plus haut, si l'humidité contenue dans le mur ne peut pas s'échapper par évaporation, si les revêtements de murs, le plancher bas, les abords extérieurs sont constitués de matériaux étanches à la vapeur d'eau.

D'autres causes de pourrissement des éléments de pourtrason ou de charpente sont d'une part les infiltrations en toiture et d'autre part l'érosion excessive de la paroi en bauge.

### Perforation des parois

Des cavités creusées par des insectes (guêpes, abeilles, fourmis) dans des zones de paroi rendues plus vulnérables par une humidité excessive contribuent à renforcer la fragilisation du mur ; les oiseaux peuvent alors renforcer l'effet de perforation en allant picorer les insectes et le mur par la même occasion. D'autres petits animaux comme les rongeurs profitent également de cette situation de fragilité pour creuser des galeries et nicher dans l'épaisseur de la paroi.

### Mérule et conioaphore

L'apparition de ces deux champignons est liée à un certain nombre de facteurs : taux d'humidité, température ambiante, obscurité, absence de ventilation, présence de cellulose. Lors de la réhabilitation de bâtiments, la mise en œuvre de doublages avec lame d'air contre des parois existantes précédemment revêtues de matériaux imperméables à la vapeur d'eau est facteur d'humidité. Les conditions sont réunies dans le vide de construction pour le développement de ces champignons sur des éléments en bois qui seraient compris dans la paroi.

### Désordres structurels

#### Fissures de poinçonnement

Une fissuration structurelle peut être favorisée sous les charges d'un appui de charpente ou de plancher mal réparties. En cas de réhabilitation lourde ou de construction neuve en bauge, l'interposition de sommier de répartition des charges permet d'éviter ce problème.

Dans un bâtiment ancien, ces pièces de répartition ont pu être abîmées suite à des fuites d'eau en toiture, il faudra donc les remplacer avant de réparer les fissures. La déficience des pièces de répartition des charges conjuguée à des fondations peu profondes en terrain meuble peuvent être fatales à l'édifice (coup de sabre).

#### Cisaillement sous les charges de toiture mal réparties

Des modifications de charpente effectuées lors de la

réhabilitation de bâtiments conduisent à la suppression de certaines pièces (entrants notamment) pour gagner du volume. Ces opérations déstabilisent le transfert des charges de la toiture, la bauge travaille en compression et supporte mal le travail en poussée.

### Fissures d'angles, désolidarisation des murs ou des pignons

Cette situation peut être provoquée par des aménagements ou événements extérieurs, tels que :

- des tassements de terrain (ruissellement d'eau, mare non entretenue, creusement de fossé, mise à jour de la fondation, ...);
- des travaux de terrassement déstabilisants (fondations d'une extension, creusement d'une piscine, réalisation d'une terrasse, ...).

Un facteur aggravant est une situation en bord de route avec le passage des véhicules qui occasionnent des vibrations.

Ces fissurations d'angles avec désolidarisation des murs peuvent aussi être le résultat d'interventions sur le bâtiment :

- modification de la charpente ;
- modification et/ou surcharge de planchers ;
- modifications de façades.



Fissure d'angle, désolidarisation des murs dues à une modification ou à un mauvais entretien de la charpente.

(Crédit photo : Robert Junalik)



Fissure de poinçonnement due au manque de pièce de répartition des charges et au manque d'entretien de la couverture.

(Crédit photo : Robert Junalik)

### Fissuration

Mise en œuvre de linteau trop faible, ouverture de baie mal située ou trop large, médiocrité des maçonneries de soubassement, ces défauts de construction sont autant de sources de tassements différentiels, donc de fissuration.

Des fissures peuvent également apparaître à la jonction avec d'autres matériaux comme des linteaux en pierre ou en bois. Dans la construction neuve ces fissures d'interface peuvent être anticipées et traitées de différentes manières (joint creux, couvre-joint, ...)

### Perte de verticalité

Ce désordre est lié à un défaut de chaînage qui peut être aggravé par d'éventuels mouvements de sols dus à des argiles gonflantes.

### Érosion de la bauge

La terre crue, matériau plus tendre que les matériaux auxquels elle est associée (bois, brique terre cuite, pierre, béton de chaux ou de ciment, ...), a tendance à s'éroder plus facilement à la jonction avec ceux-ci : linteau, chaînage, poteau, reprise de maçonnerie avec des matériaux hétérogènes, ...

### Effondrements

Quelques exemples de conjonction de causes qui ont mené à l'effondrement d'une partie d'édifice :

- présence d'enduits ciment et/ou d'isolants non perméables à la vapeur d'eau sur des murs en bauge ;

- manque d'entretien, mauvais drainage en pied de mur, mauvaise conduite des eaux de ruissellement, soubassement insuffisant ;
- remontées capillaires, apparition de salpêtre, délitement des enduits, érosion de la paroi. A long terme, ces effets successifs engendrés par le non traitement des remontées capillaires conduisent à l'effondrement ;
- remontées capillaires, abords non drainés, ouverture de baies superposées, vibrations de démolition d'un enduit ciment ;
- remontées capillaires, surcharge due à la stagnation de neige.

### Autres désordres

#### Micro fissuration

Des micro fissures régulières verticales ou diagonales localisées sur la hauteur d'une levée sont une fragilité locale due au retrait de la terre lors du séchage d'une bauge trop humide, trop épaisse ou trop argileuse.

#### Lits de microfissurations

Dans la technique du pain de terre en opus spicatum, si la liaison est mal réalisée, des micro fissures peuvent apparaître à la jonction des blocs.

## 1.2.4 - Conclusion

Quelques expériences de constructions neuves ont montré que les techniques de mise en œuvre de la bauge avaient évolué avec notamment la préfabrication en atelier de grands éléments (hauteur 0,70/1,35 m - largeur 0,40/0,60 m - épaisseur 0,40/0,50 m) mis en place à la grue et liés entre eux par un mélange bauge/chaux/ciment. Afin de réduire le temps de séchage et d'accélérer la prise de ces éléments préfabriqués, on ajoute à la terre de la chaux et/ou du ciment (stabilisation).

D'autres expériences mettent en œuvre une bauge coffrée non porteuse en parement extérieur ou intérieur ; Peut-on alors encore parler de bauge ?

**Nous vous invitons à consulter les *Guides de bonnes pratiques de la construction en bauge*.**

## 1.3 LE PISÉ



(Crédit photo : AQC)

Le pisé est une technique de construction porteuse monolithique coffrée, pratiquée dès l'antiquité, elle apparaîtrait en France après la conquête romaine. Le patrimoine construit en pisé est principalement situé dans la région Auvergne-Rhône-Alpes. La construction neuve est répartie sur tout le territoire national.

### 1.3.1 La technique et la mise en œuvre

#### La formulation du matériau

- terre (88 à 92 %) ;
- eau (8 à 12 %).

La terre à pisé idéale est un mélange qui pourrait se composer de :

- graviers 0 à 15% ;
- sables 40 à 50% ;
- limons 20 à 30% ;
- argile 15 à 25%.

#### La technique de fabrication

La terre utilisée pour le pisé est faiblement humidifiée, de 8 à 12 % et mise en œuvre sans autre composant.

L'utilisation d'adjuvants comme le ciment ou la chaux font l'objet d'un paragraphe spécifique ci-après.

#### La mise en œuvre

La terre est mise en œuvre de façon traditionnelle dans un coffrage en bois, elle est damée en lits successifs (une quinzaine de centimètres de terre permet d'obtenir après damage un lit de 8 à 10 cm d'épaisseur) sur une hauteur de coffrage d'environ 0,80 à 1,00 m pour une longueur variant de 2,00 m à 4,00 m, sur une épaisseur moyenne de 0,50 m. Le damage se fait à la main à l'aide d'un pisoir.

La "prise" de la terre se fait par le compactage. La première levée terminée, le coffrage est démonté et remonté pour la levée suivante. Il peut être nécessaire d'attendre quelques jours que le pisé ait fait son retrait pour réaliser la levée supérieure. Les banchées sont alternées avec les banchées inférieures.

Un cordon de mortier de chaux peut être mis en œuvre pour renforcer certaines zones de fragilité :

- entre le soubassement et la première banchée ; entre les banchées ;
- entre les reprises de banche (verticalement ou en biais suivant la technique de banche utilisée) ;
- dans les angles et au droit des encadrements de baies.

La construction neuve en pisé met en action des coffrages métalliques intégraux et coulissants ainsi que des fouloirs pneumatiques. Le pisé est alors plus dense que dans une mise en œuvre manuelle. La préfabrication du pisé en atelier ou sur le site est également une solution rencontrée.

L'épaisseur moyenne des murs est de 50 cm.

Les Règles de l'art :

Règles professionnelles *Enduits sur support composés de terre crue* (ECOBATIR, LE MONITEUR - 2013).

#### Extension géographique du pisé

Les terres alluviales et morainiques recherchées pour le pisé se trouvent essentiellement dans le quart sud-est de la France : Val de Saône, Bresse, Bugey, Dauphiné, Forez, Livradois, Lyonnais, Couloir rhodanien, Basse Durance, Comtat Venaissin.

Cependant on trouve des constructions en pisé dans la Beauce, en Champagne, dans le Limousin, en Bretagne et dans la vallée de la Garonne.

Ces différentes situations géographiques traditionnelles offrent une variété de terres qui caractérise une variété

de pisés. La construction contemporaine en pisé pouvant se rencontrer sur tout le territoire, les terres mises en œuvre ne sont pas toujours issues du milieu local, les caractéristiques singulières à chaque région ne peuvent plus être mises en valeur.

### Utilisation aujourd'hui

Le pisé est une des techniques de construction en terre crue les plus répandues actuellement, non seulement dans son bassin d'origine en réhabilitation et construction neuve, mais en construction neuve sur tout le territoire. De nombreuses opérations de maisons individuelles, de petits immeubles de logements, voire de bâtiments publics mettent en application le pisé tant en murs intérieurs qu'en parois extérieures.

## 1.3.2 - Les acteurs - la filière

### Les acteurs de la filière

- TERA - Terre crue Rhône-Alpes : association de professionnels indépendants regroupe une trentaine d'adhérents de toutes professions (architectes, entreprises, bureaux d'études, ...)
- Le Parc Naturel Régional du Livradois-Forez recense d'une quinzaine de professionnels de la maîtrise d'œuvre et de l'entreprise.

### La formation

Comme on l'a vu dans l'introduction, un certain nombre d'organismes dispensent des formations sur la terre crue en général, quelques-uns proposent des modules plus particulièrement réservés au pisé.

### Essais, études et recherches

Les recherches scientifiques présentent des résultats pas toujours faciles à réintégrer dans la construction ; les sujets étudiés sont fragmentés, les études portent sur des paramètres très précis et la combinaison des résultats est difficilement possible pour être insérée dans la logique constructive.

Projet PRIMATERRE : "Rénover et bâtir durable avec les matériaux premiers (maçonneries de terre crue et pierre" a pour objectif de lever les verrous scientifiques et sociétaux vis à vis des matériaux premiers. Modélisation physico-mécanique et expérimentation pour décrire les

paramètres clés du comportement thermo-hygro-hydro-mécanique des matériaux argileux.

La thèse de Quoc-Bao BUI aborde le sujet de la "Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques" (ENTPE - 2008).

Le mémoire de DSA, Architecture de Terre de Elvire LEYLAVERGNE, étudie "la filière terre crue en France.

Enjeux, freins et perspectives" (CRATerre-ENSAG 2010/2012).

Une demande de financement est en cours pour la réalisation d'une thèse sur l'isolation du pisé.

Des recherches et des essais sont en cours sur la terre coulée<sup>17</sup>.

## 1.3.3 - Les désordres recensés

### L'eau et l'humidité

Le développement de pathologies humides dans un mur en pisé peut mener jusqu'à la déstructuration de la terre, notamment à l'interface soubassement/pied de mur ; le pisé perd ainsi ses qualités de portance, ce qui peut, conjugué avec d'autres désordres ou conditions particulières, conduire à l'effondrement du mur et/ou de la construction<sup>18</sup>.

La terre coulée est une terre stabilisée à la chaux hydraulique ou au ciment, elle se travaille comme le béton de ciment : le produit est coulé entre deux banches, il est vibré et décoffré après 2 à 3 jours.

Certaines dispositions ou aménagements extérieurs au bâtiment facilitent l'amorçage et le développement de pathologies humides comme les remontées capillaires et l'humidité dans les parois :

- modification du niveau extérieur du sol ;
- imperméabilisation des sols : trottoirs, voiries ;
- modification des abords de la construction : inversion de pente du terrain, réalisation de tranchées, fossés, talus, construction contigüe, plantations, ... ;
- modification du sous-sol : déviation d'un fil d'eau, canalisations enterrées défectueuses (fuites invisibles) ;
- traitement inadapté des eaux de ruissellement dans des milieux étanches fissurés : concentration de l'eau ;
- végétation trop proche des murs, l'arrosage régulier de plantes en contact avec le mur aggrave la situation ;
- construction contre un mur en pisé emprisonnant de l'eau entre les parois contigües ;

17. La terre coulée est une terre stabilisée à la chaux hydraulique ou au ciment, elle se travaille comme le béton de ciment : le produit est coulé entre deux banches, il est vibré et décoffré après 2 à 3 jours.

18. Qualité Construction - Architecture en terre, la pathologie humide du pisé - n° 143 mars/avril 2014 - p. 66.

- incendie sur une propriété voisine avec arrosage des ouvrages en pisé et stockage des déblais humides ;
- méconnaissance de la présence du matériau terre de la part des différents intervenants (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises, ...), y compris les services techniques territoriaux (rehausse de chaussée).

Ces causes peuvent se conjuguer avec d'autres interventions sur ou dans le bâtiment et aggraver les désordres enclenchés.

### Remontées capillaires, dégradation du mur en pisé à la limite du soubassement

La hauteur, la nature et l'état du soubassement jouent un rôle important dans la préservation des remontées capillaires ; toute modification apportée au soubassement d'une construction en pisé peut avoir une incidence notable sur son état futur. Les pathologies résultant de ces remontées capillaires peuvent mettre de nombreuses années à se développer. Ainsi la modification du niveau extérieur du sol par des remblais successifs qui réduisent, voire enterrent le soubassement, mettent le pisé en contact direct avec l'humidité environnante du sol et les rejaillissements de la pluie. Les causes de remblais sont multiples : terrassement pour extension ou construction voisine (étalage des terres), modification de voirie, creusement d'une piscine, réalisation d'une terrasse, ...

Les soubassements revêtus de matériaux imperméables à la vapeur d'eau empêchent les remontées capillaires de s'évaporer, atteignant ainsi la maçonnerie en terre. (voir également chapitre 3 : Les enduits de terre crue).

Dans des bâtiments agricoles, le mur en pisé peut subir une fragilité supplémentaire dues aux animaux qui, attirés par les sels minéraux (salpêtre) véhiculés dans les remontées capillaires, lèchent les murs toujours au même niveau, au-dessus du soubassement.

### Humidité des parois

Outre les différentes causes énoncées plus haut, on recense un certain nombre d'interventions ou de situations propices à la rétention d'humidité dans les parois :

- le rejaillissement de la pluie en pied de murs, la hauteur du soubassement est insuffisante ;
- le revêtement de sol intérieur étanche : dalle en béton de ciment sur film polyane, ... ;
- l'isolation inappropriée des parois : incompatibilité des isolants étanches à la vapeur d'eau (ITI ou ITE) ;
- les parements et revêtements intérieurs : incompatibilité des matériaux imperméables à la vapeur d'eau (enduits, peintures, revêtements, ...)

- le revêtement de mur extérieur : (voir partie III : les enduits de terre crue) ;
- les débords de toiture insuffisants ;
- le manque d'entretien de la couverture et/ou des zingueries, provoquant des fuites d'eau dans les murs ;
- la modification de toiture (réalisation d'une toiture terrasse) et/ou construction de dalles béton d'étages : le désordre peut se mettre en place suivant deux causes. D'une part, l'eau contenue dans le béton à la jonction dalle/murs et d'autre part, l'eau de pluie accumulée sur la dalle en cas d'absence de couverture ;
- la réparation d'une partie de mur endommagé avec des matériaux n'ayant pas le même comportement vis à vis de l'humidité et de la vapeur d'eau. Le problème sera repoussé dans le mur et dans le temps, sans être réglé.



*Effondrement d'une maison en pisé rénovée sans prendre en compte la compatibilité des isolants vis à vis des transferts de vapeur d'eau dans la paroi.*

*(Crédit photo : Luc Robin)*

### Érosion superficielle du pisé due aux intempéries

L'érosion superficielle du pisé due aux intempéries est totalement variable, et peut être d'insignifiante à plusieurs centimètres sur certaines faces. Et démarrée, elle s'accélérera dans les creux, les zones de rejaillissement, au dessus des points durs (cordons de chaux, briques cuites, linteaux,...). Sur les murs exposés, il est préférable de prévoir une protection : enduit adapté, bardage, construction annexe (type auvent, appentis, ...).

Ces différents désordres liés à l'humidité sont susceptibles d'être aggravés par des conditions extérieures comme :

- les vibrations, la circulation routière, les travaux de terrassement, ...
- les cycles météorologiques (gel/dégel, sécheresse/fortes eaux)
- le mauvais entretien d'éléments de construction (toiture, charpente, revêtements, abords, ...).

### Désordres structurels

Le pisé ne travaille qu'en compression, dès lors que l'on déroge à ce principe des désordres sont susceptibles d'apparaître.

### Fissures verticales

Celles-ci peuvent être le résultat de plusieurs causes, notamment des tassements différentiels dus à des interventions dues à des interventions extérieures comme :

- le creusement en sous-œuvre (cave, piscine, ...);
- la modification de la portance du sol (assèchement de terrain, argiles gonflantes, ...);
- la modification des descentes de charges en poussée latérale, provoquée par une modification de charpente, par exemple la suppression des entrants pour l'aménagement des combles ;
- le poinçonnement dû à une mauvaise répartition des charges de plancher (poutrelles de plancher) ou à une modification des charges de couverture.

### Fissures verticales ou diagonales



*Désolidarisation des murs  
(Crédit photo : Véronique Galmiche)*



*Fissure de poinçonnement  
(Crédit photo : Véronique Galmiche)*

Elles sont causées par l'ouverture de baies trop larges, mal situées, des linteaux mal dimensionnés. Elles peuvent également provenir de l'accrochage mal situé, trop superficiel ou inadapté d'ouvrages rapportés tels que

cheminée, escalier, terrasse, ...

### Fissures de jonction

Des fissures d'interface apparaissent entre les différents matériaux lors de tassements différentiels du bâtiment.

En construction neuve, pour répondre aux règles parasismiques, la terre est intégrée en remplissage d'une ossature béton ; ces deux matériaux ont des comportements distincts : temps de séchage et de prise dissemblables, rigidité du béton opposé à la souplesse de la terre, tassements faiblement différentiels, ..., d'où l'apparition de fissures à l'interface entre eux. Ce problème peut être anticipé en travaillant sur la mise en place de joint creux ou de couvre joint. Mais il pourrait peut-être aussi se résoudre grâce à une meilleure connaissance des capacités porteuses de la terre.

Les linteaux, jambages, poteaux, ..., en bois, pierre, béton, ..., sont autant de points de jonction susceptibles d'être à l'origine de fissures.

En réhabilitation ou réparation, l'insertion de matériaux hétéroclites, plus rigides, comme des parpaings de ciment, des blocs de béton cellulaire, de la pierre, des briques de terre cuite, ... modifient l'homogénéité de résistance mécanique du mur, avec pour conséquence l'apparition de fissures. La réparation sur la demi épaisseur extérieure qui ne résoudrait pas la cause ne va pas empêcher le développement de la pathologie humide dans la partie intérieure.

L'installation d'équipements électriques (coffret EDF) dans la maçonnerie de pisé est assimilable à l'insertion de matériaux hétéroclites et peut avoir les mêmes conséquences.

### Fissures horizontales

L'apparition de fissures horizontales dans un enduit en bas du mur (à la zone d'interface soubassement / pisé) est aussi un signe d'alerte d'un écrasement humide du pisé en cours.

### Flambement du mur

Celui-ci peut être un des résultats de la modification des charges et descentes de charges sur les murs, par exemple, la création de dalles béton, ou lié à l'absence de contreventement d'une grande surface de mur.

### Dégradation des ouvrages par les autres corps d'état

Que ce soit sur des ouvrages préfabriqués ou sur des murs montés en place, l'inattention des entreprises du

chantier peut provoquer des dégradations sur l'aspect fini du pisé : épaufrures, perforations, salissures, ...

### Autres désordres

Les micro-fissurations résultent du retrait de l'eau au séchage, elles ne sont pas problématiques, mais ne sont pas tolérées par les maîtres d'ouvrage. Ce phénomène peut se rencontrer dans le cas de l'utilisation de terre coulée qui s'éloigne un peu de la technique de la terre pisée. Afin de remédier à l'apparition de ces fissures de retrait, l'emploi de dispersants permet de liquéfier la terre avec moins d'eau.

### La stabilisation

Les adjuvants servant à la stabilisation de la terre sont de deux types :

- ceux qui modifient la composition du matériau sans modifier son comportement physico-chimique : fibres végétales ou animales, sables, graviers, ... ;
- ceux qui modifient la composition du matériau en modifiant son comportement physico-chimique : chaux aérienne, chaux hydraulique, ciments.

La stabilisation du pisé se fait avec de la chaux (hydraulicité de 2 à 5) et/ou du ciment, les dosages usuels sont de l'ordre de 2 à 8 %.

La stabilisation de la terre, avec du ciment ou des chaux fortement hydrauliques, limite sa sensibilité à l'action de l'eau, mais elle modifie son comportement par rapport à la vapeur d'eau. En cas de gel, les argiles ne gonflent pas (comme elles le feraient en présence d'humidité) mais elles perdent leur capacité d'agglomérer suite au cycle gel/dégel.

Cette stabilisation modifie le mélange naturel et peut créer des désordres spécifiques, l'interaction ciment/argile n'est pas neutre dans le comportement de la paroi. La terre stabilisée prend plus vite qu'elle ne sèche, l'argile perd sa fonction, elle devient comme un granulats du ciment.

Il est nécessaire de tester les argiles lors de la stabilisation - ce qui n'est pas fait de façon systématique. D'autre part, la prescription d'argiles stabilisées peut entraîner l'utilisation d'argiles exogènes. Les terres préparées peuvent provenir de carrières très éloignées du site du chantier, rendant ainsi caduc le volet environnemental de ce matériau qui tire un de ses intérêts de l'utilisation locale de la matière première extraite du lieu même de la construction ; sans parler de la fin de vie de la paroi qui en cas de stabilisation ne pourra pas repartir à la terre ou être réemployée.

19. Un des principaux intérêts de ce matériau.



Dégradation du parement d'un muret en pisé stabilisé  
(Crédit photo : Stéphane Peignier)

## 1.3.4 - Conclusion

Une certaine méconnaissance des caractéristiques structurelles et des capacités hygrométriques<sup>19</sup> du pisé peuvent conduire à de mauvaises mises en œuvre et à des utilisations inappropriées. Les désordres arrivent souvent à cause d'une conception inadéquate ou d'une mauvaise mise en œuvre. En réhabilitation, la préconisation de matériaux et techniques inappropriés conduit à des perturbations de l'équilibre des parois existantes qui peuvent être fatales à la paroi.

Il semble qu'en marchés publics, l'utilisation du pisé soit rendue difficile par des démarches de type Titre V. Les temps de réalisation ne sont pas non plus toujours adaptés à ce matériau qu'il est préférable de mettre en œuvre à la bonne saison (printemps -été) et dans des délais cohérents. Bien souvent, et pour plus de facilité, les appels d'offre publics sont passés en terre stabilisée, ce qui n'est pas forcément sans conséquences, le pisé étant différent de la terre stabilisée.

Les entreprises qui maîtrisent ces techniques ne sont pas, en général, celles qui répondent le plus facilement aux marchés publics.

Le développement de techniques telles que la terre stabilisée ou la terre coulée, amènent à des pratiques différentes de celles du pisé proprement dit. Des recherches sur des produits dérivés sont en cours avec par exemple le ciment d'argile.

**Nous vous invitons à consulter les Guides de bonnes pratiques de la construction en pisé.**

## 2. LES TECHNIQUES DE REMPLISSAGE ET DE DOUBLAGE

Les techniques de construction de remplissage et de doublage en terre crue sont assujetties aux règles de l'art de la construction bois et notamment au NF DTU 31.1 qui vise la construction neuve.

Tout comme pour les techniques porteuses, certains éléments de ces textes, auxquels les professionnels doivent se référer pour la construction et la réhabilitation présentent des incompatibilités au regard des caractéristiques et capacités physiques du matériau terre ; celles-ci induisant des situations critiques, notamment par exemple en matière de réhabilitation énergétique.

Les exigences réglementaires ne sont pas adaptées au matériau "Terre Crue", notamment au torchis en réhabilitation, où la réglementation s'applique élément par élément. La technique de la paille allégée essentiellement utilisée en construction neuve entre plus facilement dans les calculs de la Réglementation Thermique.

Recherches scientifiques et séries d'essais, devraient faire avancer les connaissances, faciliter la caractérisation et mettre en exergue les qualités intrinsèques de ces matériaux de remplissage.

## 2.1 LA TERRE-PAILLE OU LA TERRE ALLÉGÉE



(Crédit photo : AQC)

La terre-paille ou terre allégée est une technique récente de remplissage de coffrage autour d'une ossature bois intégrée. Elle est apparue en Allemagne au lendemain de la première guerre mondiale, elle se pratique en France depuis quelques dizaines d'années.

### 2.1.1 - La technique et la mise en œuvre

#### La formulation du matériau

- terre argileuse (10 à 20 % en volume) ;
- paille (80 à 90 %) - blé ou sarrasin pour le compactage - orge ou avoine pour la préfabrication ;
- eau .

D'autres fibres peuvent également être utilisées : roseaux séchés, tiges de colza, bruyère, paille de lavande, aiguilles de pin, copeaux de bois ou de chanvre, liège, ... Des granulats comme le verre cellulaire, la perlite ou le mâchefer sont aussi susceptibles d'être mélangés à la terre.

#### La technique de fabrication

La terre à l'état liquide (consistance d'une pâte à crêpe) est mélangée à la paille afin de bien enrober les fibres.

#### La mise en œuvre

Le mélange est mis en œuvre fortement compacté à la main, dans un coffrage englobant l'ossature principale en bois. La technique s'utilise en murs porteurs et non porteurs, cloisons, planchers et toitures et pour la préfabrication de briques ou de panneaux.

Suivant la zone géographique et les conditions météorologiques, un temps de séchage de 4 à 9 mois est requis pour une épaisseur de 30 cm, ce qui implique une

mise en œuvre au printemps et en été pour un séchage optimal avant l'hiver ; la préfabrication de briques ou de panneaux permet une mise en œuvre toute l'année. L'épaisseur du remplissage est en général de 30 cm, ce qui est un maximum au nord de la Loire.

Les cloisons et murs intérieurs peuvent être moins épais, de l'ordre de 15 cm : la terre-paille peut également être utilisée en doublage intérieur ; elle est alors mise en œuvre sur une épaisseur de 15 cm dans un coffrage dont une des parois est constituée par le mur existant.

Les Règles de l'art :

- NF DTU 31.1 : Charpente et escaliers en bois
- NF DTU 31.2 : Maisons à ossature bois
- EUROCODE 5 : Calcul des structures en bois
- Règles professionnelles *Enduits sur support composés de terre crue* (ECOBATIR, LE MONITEUR - 2013)

#### Extension géographique de la terre-paille

Cette technique contemporaine, se rencontre sur tout le territoire. En remplissage d'ossature bois porteuse, essentiellement dans la moitié sud, même si on peut en trouver des applications jusqu'aux alentours de Lille. En complément d'isolation et remplissage de colombages dans les régions à torchis, dans le Nord, en Alsace, en Champagne.

#### Utilisation aujourd'hui

En technique de remplissage d'ossature on recense principalement des maisons individuelles et de petits équipements.

En doublage, la technique se trouve en réhabilitation ou en rénovation de bâti ancien aussi bien en pierre qu'en ossature bois.

## 2.1.2 - Les acteurs - la filière

### Les acteurs de la filière

Il n'y a pas de structure spécifiquement dédiée à la technique de la construction en terre-paille. Un site internet propose un volet technique, un répertoire de professionnels, un catalogue de réalisations dédiées à cette technique (<https://terrepaille.fr>).

L'association ARESO, offre toute une série de services sur son site internet : fiches techniques (différentes techniques de terre crue), fiches matériaux, conférences, liste de professionnels, ...

### La formation

Certaines associations et coopératives proposent des formations lors de chantiers participatifs. Les organismes de formation BATIPÔLE, CANTERCEL, NORIA et Cie proposent des sessions de quelques jours pour apprendre la construction en terre-paille.

### Essais, études et recherches

Un essai au feu a été réalisé en septembre 2013 au laboratoire FCBA de Bordeaux selon le protocole normalisé (test SBI selon norme NF EN ISO 11925-2), avec un résultat C-s1-d0 pour des échantillons de 350 kg/m<sup>3</sup> sans revêtement (difficilement inflammable, sans production de fumées, ni gouttelettes).

Les essais thermiques : conductivité thermique, isothermes d'adsorption et désorption, perméabilité à la vapeur d'eau et masse volumique apparente sont en cours de réalisation au LNE à Paris (certifié COFRAC) et au LMDC (Toulouse)<sup>20</sup>.

## 2.1.3 - Les désordres recensés

### L'eau et l'humidité

Cette technique de construction récente ne présente pas tout à fait le même profil de désordres que les autres techniques étudiées. Par exemple, les problèmes posés par la réhabilitation inadaptée des constructions anciennes ne se retrouvent pas.

La sensibilité à l'eau du matériau terre-paille reste pertinente puisque la faible proportion de terre peut, en cas de mauvaise mise en œuvre et/ou de mauvaises conditions de séchage, transformer le matériau en compost. Les causes sont plurielles.

### Apparition de moisissures

Celles-ci apparaissent dans des conditions de mise en œuvre défectueuses ou avec un matériau mal préparé :

- mauvaise qualité de la terre (trop maigre, contenant de l'humus, adjonction de chaux, ...);
- mauvaise qualité des fibres (trop courtes, défibrées, ...);
- paille humide (à plus ou moins long terme suivant la qualité de la paille : blé, riz, ...);
- mauvais enrobage des fibres (barbotine trop diluée ou trop peu de terre);
- mélange compacté trop humide - manque de repos du mélange;
- temps de séchage trop long (mélange trop humide ou mise en œuvre à une mauvaise période);
- séchage contrarié (pose des châssis, des revêtements, du bardage, ou des enduits, réalisée trop tôt)<sup>21</sup>.
- mauvaise conception (murs trop épais);
- façades mal exposées non protégées (pluies et vents dominants)

L'épaisseur des murs a également une incidence sur les temps de séchage. Un mur qui peut sécher des deux côtés aura une épaisseur maximale de 30 cm (jusqu'à 40 cm en climat méditerranéen), un mur qui sèche sur une seule face (coffrage perdu ou contre-cloison) aura une épaisseur de 15 cm.

La situation géographique induit des conditions d'utilisation de cette technique : les murs auront une épaisseur inférieure à 30 cm au nord de la Loire, ainsi qu'il est peu recommandé de construire en terre-paille à une altitude supérieure à 500 m au nord de la Loire. Les utilisations les plus fréquemment rencontrées dans ces régions sont la rénovation de murs à pans de bois et le doublage isolant d'ouvrages à pans de bois existants.

### Pourriture et dégradation ponctuelles du mur

Les dégradations ponctuelles du mur, la pourriture du remplissage peuvent être dues à la mauvaise exécution ou à la non réalisation d'ouvrages annexes. L'application des NF DTU n'étant pas effective par l'ensemble des professionnels, certains désordres sont issus de ces inobservances :

- l'absence de rupture de capillarité et de drainage en pied de mur;
- l'absence de relevé étanchéité de terrasse entraînant le rejaillissement de l'eau sur le mur;

20. <https://terrepaille.fr/base-de-donnees>

21. Franz VOLHARD - *Construire en terre allégée*, ACTES SUD, 2016 - p. 172.

- des remontées capillaires par les enduits de finition posés sans garde au sol (voir illustration chapitre 3 Enduits de terre crue) ;
- l'absence de lisse basse pour la pose de l'ossature bois (le bois debout absorbe plus facilement l'eau) ;
- l'absence d'enduit ;
- la pose de pare-pluie sans bardage (déchirure du pare-pluie et infiltrations d'eau) ;
- le trop faible débord de toiture ;
- des appuis de fenêtres non étanches (appuis en terre cuite ou en enduit à la chaux qui se fissure)...



Remplissage endommagé par l'infiltration d'eau dans des enduits fissurés.  
(Crédit photo : Lucie Dautreppe)



Remontées capillaires dans des enduits sans garde au sol  
(Crédit photo : Lucie Dautreppe et Charles Cintré)



Pourriture du remplissage et de l'ossature bois suite à la mise en œuvre d'un enduit sans garde au sol sur une façade exposée.  
(Crédit photo : Lucie Dautreppe)



Pare-pluie dégradé par manque de protection (bardage)  
(Crédit photo : Lucie Dautreppe et Charles Cintré)

### Germination de la paille

La présence éventuelle de grains dans la paille peut, dans un milieu humide, amener à leur germination ; lorsque les pousses sont sèches elles sont éliminées et le phénomène disparaît. La germination peut favoriser le séchage en absorbant l'humidité du mélange.

### Désordres de construction

#### Fissuration d'angle

Les sections de bois utilisées pour l'ossature d'un remplissage en terre-paille sont plus importantes que pour la construction à ossature bois traditionnelle ; les bois utilisés, spécialement débités, sont encore humides (20 à 30 %), de plus l'eau contenue dans le mélange terre-paille renforce ce taux d'humidité.

Lors du séchage, si les deux composants (ossature et mélange) ne sont pas au même taux d'hygrométrie, le séchage se fera de façon différenciée, de ce fait, un très léger rétrécissement en longueur des bois d'ossature peut engendrer une légère déformation de la structure qui peut se répercuter par la fissuration des enduits aux angles de la construction.

Si les bois et le mélange présentent un même taux d'hygrométrie, le séchage sera homogène. L'utilisation de fibres longues (pailles de plus de 20 cm) permet de pallier à cette éventuelle difficulté due au séchage différencié des bois et du remplissage.

#### Capillarité ou infiltration

Certains accessoires tels que les appuis de fenêtre en terre cuite ou en enduit à la chaux peuvent être source de problèmes, les matériaux étant un peu poreux ou susceptible de fissurer, l'eau s'infiltré et atteint le remplissage.

#### Micro fissuration

Les jonctions mur/fenêtre et mur/toiture peuvent être sources de micro fissuration nuisible à l'étanchéité à l'air de la construction ; la mise en œuvre d'accessoires spécifiques permet de les éviter.

## 2.1.4 Conclusion

L'association d'un matériau isolant comme la paille et d'un matériau à forte inertie comme la terre confère au mélange terre-paille des propriétés thermiques et hygrométriques équilibrées et intéressantes.

Cette technique permet de réaliser des ouvrages extérieurs et intérieurs non porteurs (murs, toitures, cloisons) suivant des conditions de mise en œuvre bien définies ; la préfabrication de panneaux permet de s'affranchir de certaines d'entre elles : saisonnalité, temps de séchage, suppression des coffrages, ... Plusieurs types de produits sont proposés :

- briques ;
- blocs pour murs extérieurs, planchers, colombages, cloisons ou murs intérieurs ;
- panneaux pour remplissage, cloisons, doublages, revêtements intérieurs (le faible poids du mélange permet la fabrication de panneaux de grandes dimensions) ;
- panneaux pour chauffage mural avec réseau de canalisations incorporé ;
- mortiers de pose.

Ces différents produits préfabriqués facilitent la mise en œuvre, réduisent la durée du chantier, permettent la construction en toutes saisons et en tous lieux. Ils peuvent facilement être préfabriqués par le professionnel en amont du chantier, il faudra néanmoins prévoir un temps de séchage approprié.

***Nous vous invitons à consulter les Guides de bonnes pratiques de la construction en terre allégée.***

## 2.2 LE TORCHIS



(Crédit photo : AQC)

Le torchis est une très ancienne technique de construction de remplissage d'ossatures à pans de bois qui s'est répandue sur tout le territoire notamment dans les régions riches en bois et plutôt pauvres en pierre de construction. La grande variété des techniques mises en œuvre, tant de l'ossature que du remplissage, en fait un patrimoine riche et diversifié.

### 2.2.1 - La technique et la mise en œuvre

#### La formulation du matériau

- terre variable dans sa composition : limoneuse à relativement argileuse ;
- fibres végétales ;
- eau ;
- sable ou gravier éventuellement si la qualité de la terre le nécessite.

#### La technique de fabrication

La terre est mélangée aux fibres végétales, celles-ci sont principalement des pailles d'orge de seigle ou de blé, du foin, des roseaux, de la balle de céréale, ... Ces fibres sont de longueurs variables pour une bonne cohésion du mélange, de quelques centimètres elles peuvent aller jusqu'à 30 à 35 centimètres, voire plus pour le seigle.

#### La mise en œuvre

Le mélange est mis en œuvre à l'état plastique sur de petits éléments en bois solidaires de l'ossature porteuse. Il peut être utilisé en mur, en cloison, en dalles et en plafond. Suivant les régions le support et son nom varient, on recense trois principes :

- le clayonnage est un tressage de baguettes souples sur une trame de barreaux verticaux ou horizontaux insérés entre les bois d'ossature avec un pas d'environ

30 centimètres (Bresse, Alsace, Lorraine, Normandie, Flandres) ;

- éclisses, branchettes ou palissons ont leurs extrémités glissées dans un rainurage façonné sur les parois internes des pièces du colombage (Champagne, Sud-Ouest) ;
- le lattis est fixé sur une ou deux faces du pan de bois formant coffrage pour le torchis inséré entre ces clairevoies. Le torchis sera ensuite également appliqué sur le lattis afin de recouvrir intégralement la structure bois (Picardie, Artois, Normandie orientale, Beauvaisis).

Aujourd'hui, la technique du lattage cloué est employée, quelle que soit la région.

La formulation du torchis (quantité de fibres), le mode d'application (plaqué ou enroulé) et la forme donnée au produit (boulette, mèches, torches) varient suivant le type de support.

Suivant que le pan de bois sera laissé apparent avec un enduit ou sans enduit, le nu de finition du torchis sera plus ou moins affleurant au pan de bois.

Pour les sols, la technique du lattis date de l'époque gallo-romaine. La technique consiste à enrouler une torche de foin autour d'un barreau de bois puis à la tremper dans une barbotine. Les quenouilles sont posées en rangs serrés sur le solivage, l'ensemble est aplani par une pâte de terre sur laquelle on peut fixer un parquet. La technique actuelle consiste à poser un torchis sur un lattis serré. Dans les deux cas, les sous-faces sont travaillées avec un badigeon de chaux.

L'épaisseur du remplissage se situe entre 8 et 15 cm, allant parfois jusqu'à 25 cm.

Les Règles de l'art :

Règles professionnelles *Enduits sur support composés de terre crue* (ECOBATIR, LE MONITEUR - 2013)

### Extension géographique du torchis

On distingue deux grandes familles de torchis :

- Les pans de bois apparents, où le torchis remplit l'ossature, se trouvent en Alsace, Lorraine, Champagne, Franche-Comté, Bourgogne, Lyonnais, Normandie, Bretagne, Orléanais, Bourbonnais-Nivernais, Maine, Berry, Gascogne, Pays Basque ;
- Les pans de bois cachés, où le torchis remplit l'ossature et couvre le pan de bois, ce qui permet de le protéger, sont principalement situés en Normandie, Champagne région du Porcien, Picardie, Artois.

Le torchis est une technique de construction qui peut se rencontrer sur tout le territoire dès lors que les ressources locales en bois existent.

### Utilisation aujourd'hui

Cette technique est employée aujourd'hui essentiellement en entretien, réhabilitation et restauration d'habitat existant ou de petit patrimoine (granges, lavoirs, ...). Quelques monuments historiques publics peuvent bénéficier d'une réfection à l'identique.

La construction neuve est réservée à la réalisation de cloisons intérieures ou de planchers, la réglementation thermique ne permettant pas la réalisation de murs extérieurs.

## 2.2.2 - Les acteurs - la filière

### Les acteurs de la filière

Comme il a été dit dans l'introduction, il n'existe pas de structure spécifiquement dédiée à la technique du torchis. Au début des années 2000, dans la région Nord-Pas-De-Calais-Picardie, une dizaine d'organismes (professionnels et institutionnels) se sont groupés pour sauvegarder et développer le bâti à pan de bois et torchis<sup>22</sup>. Le PNR des Caps et Marais d'Opale, le CODEM, notamment, œuvrent pour la connaissance du bâti à pan de bois.

L'association des artisans du Torchis (Seine Maritime et Eure) est active dans la promotion de la terre crue et la restauration du patrimoine.

### La formation

L'association TIEZ BREIZ, en Bretagne propose une formation en deux jours dédiée à la bauge et au torchis.

L'IUMP (Institut Universitaire des Métiers du Patrimoine)

de Troyes propose une formation (CAP - Bac Pro - DU) section maçonnerie avec un module réservé au torchis. D'autres organismes tels que le Greta des Estuaires et MPF proposent également des formations sur la technique du torchis.

### Essais, études et recherches

Études ENTPE/CSTB de caractérisation et de recherche pour la mécanisation du torchis prêt à l'emploi. D'autre part, une étude "Mortier" de l'ENTPE est en cours.

## 2.2.3 - Les désordres recensés

### L'eau et l'humidité

Comme pour les techniques de la terre porteuse, les aménagements et interventions extérieurs peuvent être à l'origine de désordres et favoriser le développement de pathologies humides :

- l'exhaussement des sols d'origine :
  - concourt à l'enfouissement des soubassements et des sablières basses et conduit à leur dégradation ;
  - augmente l'effet de rejaillissement de l'eau de pluie sur la sablière basse et les pieds de poteaux ;
- la mauvaise mise en œuvre du drainage aux abords du bâtiment induit la stagnation des eaux de ruissellement au pied des constructions et dans les fondations ;
- l'étanchéité des trottoirs et des voiries.
- l'étanchéité des trottoirs et des voiries.

Des aménagements et des interventions sur le bâtiment favorisent les pathologies humides, on peut relever les remontées capillaires, le ruissellement d'eau, la condensation :

- la mauvaise récupération des eaux de pluie (absence de descente d'eau) ;
- le défaut d'entretien de la couverture et des zingueries peut toucher la sablière haute et modifier la répartition des charges (voir aussi ci-dessous les désordres constructifs) ;
- le défaut de protection des façades exposées ;
- la rénovation et la réhabilitation avec des matériaux et/ou produits inadaptés ;
- la réalisation de dalles et chapes en béton de ciment avec film imperméable et/ou la mise en œuvre de revêtements de sol étanches (carrelage, revêtements plastiques, ...).

22.. PNR des Caps et Marais d'Opale - Guide technique du bâti à pan de bois et torchis - décembre 2009.

- le dégagement du pan de bois pour le rendre apparent sur des constructions initialement conçues à pans de bois cachés rend la structure sensible à l'eau surtout si elle est en orme.

Ces situations peuvent contribuer à l'aggravation de fragilités préexistantes ou à la création de pathologies qui trouvent leur origine dans la dégradation de parties connexes de l'ouvrage en torchis.

### Dégradation du pan de bois

L'ensemble ossature/remplissage fonctionne en symbiose, quand l'un est affecté l'autre est également touché :

- la mauvaise gestion des eaux de pluie (fuites de toitures, gouttières bouchées ou percées) provoque des infiltrations dans les murs gouttereaux engendrant la pourriture des bois de structure, le gonflement et la désagrégation du torchis (les cycles gel/dégel anéantissent le pouvoir agglomérant des argiles).
- le mauvais fonctionnement hygrométrique de la paroi à couches multiples peut favoriser l'attaque des bois de structure et de support du torchis et ne laisse pas indemne le remplissage ;
- la mise en œuvre d'essences de bois de moyenne qualité pour réaliser les supports de torchis peut avoir une incidence sur sa pérennité (bois peu résistant à l'humidité, bois sensibles aux insectes xylophages, ...)

### Corrosion de pièces métalliques

Des pièces métalliques (clous, pointes, vis, ...) servant à la liaison des éléments de supports de torchis avec la structure ou à maintenir des poches de réparation (tiges, grillages, ...) peuvent se corroder au contact d'une humidité excessive de la paroi.

### Développement de moisissures et de champignons

La cellulose des bois de structure et des fibres du torchis est un terrain propice au développement de moisissures et champignons. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de leur apparition et certaines d'entre elles sont susceptibles de mettre en jeu la pérennité de l'ouvrage. -

- Les moisissures apparaissent suite à :
  - un défaut de protection vis à vis des intempéries pendant la réalisation ; . un manque de ventilation ;
  - l'emploi d'une terre de mauvaise qualité (contenant de la terre végétale, terre trop liquide ou pas assez argileuse) ;
  - l'intégration de fibres dégradées.

Les moisissures peuvent également apparaître sur de vieux torchis dégradés par une humidité excessive contenue dans les murs.

- La mэрule et le conioflore des caves sont susceptibles de se développer derrière des doublages étanches à la vapeur d'eau ; ceux-ci, posés avec un vide de construction (doublages sur ossature), contre une paroi, elle-même anciennement recouverte d'un matériau étanche à la vapeur d'eau, contribuent à créer une concentration d'humidité confinée dans un espace obscur et non ventilé. La cellulose des pièces de bois de la structure et des fibres végétales du torchis sont des supports de développement.

### Modification du fonctionnement hygrométrique de la paroi

Dans le cas de réparations, le remplissage de la structure par des matériaux hétéroclites tels que le béton cellulaire, la brique de terre cuite, le parpaing de ciment, le béton de ciment, l'isolant en polyuréthane, l'enduit ciment empêchent les transferts de vapeur d'eau pouvant porter atteinte à la structure du pan de bois. La rigidité de ces matériaux de rénovation est en contradiction avec la souplesse du bois et ses assemblages.

La mise en œuvre du torchis nécessite une attention particulière concernant la saisonnalité et les conditions de séchage, des désordres spécifiques en découlent.

### Desquamation du torchis

Ce désordre provient de mauvaises conditions de séchage ou d'une mise en œuvre à la mauvaise saison. Le torchis est ainsi exposé à des situations de gel dans la masse. Les temps de séchage sont à adapter suivant les régions, la protection aux intempéries est également indispensable.

### Décollement du torchis

Le mauvais accrochage du torchis sur le lattage peut être dû à un support trop lisse et/ou trop sec, à un mélange trop sec.

### Désordres constructifs

De nombreuses causes peuvent conduire à la déformation de la structure principale du pan de bois, tant au niveau des assemblages qu'au niveau des bois eux-mêmes, entraînant une fissuration du torchis :

- l'affouillement au pied des soubassements induit la mise en décompression des fondations et le glissement des transferts de charge ;
- la découpe de poteau, poutre, contreventement ou entrain de charpente pour modification du volume utilisable entraîne la modification des efforts sur les murs : augmentation du volume de stockage agricole, combles habitables ;
- l'ouverture de baies mal situées ou trop importantes par rapport à la structure porteuse : découpe des bois d'ossature, position en angle, superposition, ... ;
- le décloisonnement pour augmentation et modification du volume habitable exécuté sans tenir compte de la logique du pan de bois ;
- l'utilisation mal appropriée de la construction, notamment en surcharge de plancher (surcharge d'exploitation, surcharge d'aménagement : dalle béton, revêtements durs, ...), sollicite la charpente ;
- l'alourdissement des murs suite au remplacement du torchis par des matériaux plus lourds, plus rigides (briques de terre cuite, parpaings et béton de ciment) ou par des doublages isolants lourds et non appropriés, sur des fondations légères.

Toute une série de fissures peuvent apparaître au moment de la réfection des constructions, elles sont dues à des causes diverses telles que :

- l'instabilité de l'ossature engendrée par un manque de renfort ou de contreventement ;
- la faiblesse au droit des baies : fissures diagonales ;
- le recouvrement insuffisant des lattes par le torchis ou un torchis trop plastique et trop peu fibré : fissuration horizontale fantôme ;
- un mauvais dosage terre/adjuvants : fissuration ou décollement du torchis ;
- trop d'argile dans le mélange, un mélange trop humide et/ou un séchage trop rapide (exposition au soleil ou vent) : fissuration à l'interface structure/torchis. La pénétration d'eau dans les interstices ainsi créés facilite la progression de l'humidité dans le corps du remplissage.

L'aspect irrégulier du torchis, qui s'apparente plus à un désordre esthétique que technique, provient de l'espacement trop important entre les lattes du support ou de la mise en œuvre d'un torchis trop plastique et pas suffisamment fibré.

### 2.2.4 - Conclusion

Le manque de connaissances, des entreprises n'ayant pas reçu une formation professionnelle, la mauvaise interaction des métiers, l'absence d'entretien des constructions, des réhabilitations inadaptées sont autant de causes des désordres que l'on peut rencontrer ; constats également relevés pour les autres techniques de construction en terre crue.

L'uniformisation des pratiques est en cours, avec l'adoption du lattage cloué, quelle que soit la région et l'ouvrage à réaliser (mur, cloison, plancher) en construction neuve comme en réhabilitation.

Sauf peut-être dans le cas de restauration à l'identique de patrimoine historique où toutes les composantes dépendantes du lieu peuvent être préservées : mélange, quantité de fibres, type de fixation (éclisses, palançons, clayonnage, lattis), pans de bois visibles ou cachés.

La réhabilitation thermique du bâti ancien pose des difficultés quant à la prise en compte du fonctionnement physique de la paroi ; par ailleurs, la Réglementation Thermique 2012 élément par élément ne permet pas de considérer l'enveloppe globale de la construction, ce qui dessert les techniques de construction en terre crue dont le torchis traditionnel sans isolation.

Quant à la mise en œuvre d'une isolation, les avis divergent sur sa position : l'isolation par l'intérieur pour conserver la qualité esthétique de la façade ou l'isolation par l'extérieur pour éviter les problèmes liés aux transferts de vapeur d'eau et conserver les qualités hygroscopiques de la paroi.

La réhabilitation thermique des ouvrages à pans de bois est rendue possible par la mise en œuvre de remplissages en terre-paille, en terre-chanvre ou en chaux-chanvre. Cependant, cela éloigne de la technique du torchis.

L'utilisation du pan de bois et torchis pour des éléments de cloisons et de plancher/plafond est tout à fait admis en construction contemporaine.

**Nous vous invitons à consulter *les Guides de bonnes pratiques du torchis*.**

## 3. LES ENDUITS DE TERRE CRUE

Les enduits, qu'ils soient constitués de terre crue ou de chaux, aérienne ou faiblement hydraulique bénéficient de règles professionnelles dès lors qu'ils sont appliqués sur des supports de terre crue ("Enduits sur supports composés de terre crue - Règles professionnelles") et sur des bottes de paille en remplissage isolant ("Règles professionnelles Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit").

Ce texte de référence vient en complément de la NF DTU 26.1, (applicable aux enduits et mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne) et permet aux professionnels de s'appuyer sur un document constitué de deux outils :

- les règles professionnelles;
- des études de cas.

Les règles professionnelles précisent les contours de la fabrication et de la mise en œuvre des enduits sur tous les supports de terre crue. Les fiches d'exemples de mise en œuvre, au nombre de soixante-trois, présentent une variété de solutions qui offrent aux professionnels la possibilité de réaliser leurs chantiers en fonction des supports et de l'effet de finition recherché, sans pour autant appliquer de recette.

Dans le paragraphe "Les désordres recensés", les enduits en terre crue sont abordés en priorité, puis une deuxième partie est consacrée aux conséquences de l'emploi d'enduits ciment ou d'enduits à la chaux fortement hydraulique sur des constructions en terre crue des différentes techniques précédemment étudiées.

## 3. L'ENDUIT



(Crédit photo : AQC)

### 3.1 - La technique et la mise en œuvre des enduits de terre crue

#### La formulation du matériau

- terre ;
- eau ;
- sable en cas de terre trop argileuse.
- fibres : végétales, animales ou synthétiques disponibles localement (balles de céréales, paillettes de lin, blé, avoine, foin, chanvre, genêts, joncs, poils d'animaux (cochon, vache, ...), filasse, copeaux de bois, fibre de verre, ... ;

Autres composants possibles :

- colorants naturels ou artificiels ;
- granulats : pouzzolane, pierre ponce, brique pilée, billes d'argile, ...

L'adjonction de chaux aérienne (CL, DL) ou de chaux hydraulique naturelle (NHL 2, NHL 3,5, NHL 5) est envisagée pour la réalisation d'enduits sur des façades exposées aux intempéries.

La chaux hydraulique modifie la composition et la réaction chimique de l'enduit ainsi que son comportement face au transfert de la vapeur d'eau, on parle alors de terre stabilisée.

#### La technique de fabrication

La préparation de la terre peut se faire suivant deux modes :

- le mode sec : la terre est broyée, tamisée ; le mortier préparé avec cette poudre sèche et l'eau devra reposer avant l'application pour une bonne ouvrabilité de la terre ;
- le mode humide : la terre est mélangée à de l'eau, la barbotine obtenue est tamisée ; l'utilisation de cette pâte humide ne nécessite pas de repos du mortier avant l'application.

Des machines, de type bétonnière, malaxeur, broyeur, peuvent être utilisées pour préparer l'enduit.

#### La mise en œuvre

Suivant l'exposition de la façade, l'état du support, l'effet recherché, plusieurs couches sont appliquées :

- le renformis : rebouchage de trous, comblement de manques, permet les réparations du support ;
- le gobetis : couche de préparation pour l'accrochage du corps d'enduit ;
- le corps d'enduit : couche qui constitue l'enduit proprement dit ;
- la finition : donne l'aspect définitif de l'enduit, texture et couleur ;
- le badigeon : autre mode de finition plus légère.

L'application de ces différentes couches peut se faire manuellement ou pour certaines à la machine à projeter.

Les Règles de l'art :

- NF DTU 26.1 "Travaux de bâtiment - Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne".
- Règles professionnelles *Enduits sur supports composés de terre crue* (ECOBATIR, LE MONITEUR - 2013).
- Règles professionnelles *Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit* (RFCP, LE MONITEUR - 2014).

#### Extension géographique des enduits à la terre

Les enduits à la terre crue peuvent se rencontrer sur l'ensemble du territoire ; ils sont en général appliqués sur des murs en terre crue, mais ils peuvent également l'être sur des supports en pierre maçonnée à la terre, ou tout autre type de supports.

#### Utilisation aujourd'hui

Les enduits en terre crue sont essentiellement mis en œuvre en réhabilitation du bâti ancien sur tous les types

de supports en terre crue ou en pierre appareillées à la terre crue, pour des maisons individuelles et de petits équipements, mais également en construction neuve (essentiellement des maisons individuelles) sur des supports en torchis, en terre-paille, en bauge, en pierre, ...

Les enduits intérieurs à la terre crue se développent largement tant en maisons individuelles qu'en petits équipements. En corps d'enduit, aussi bien en murs qu'en cloisons et sur tous types de supports, ils participent à la décoration et au confort hygrométrique de l'habitat grâce à leur qualité hygroscopique ; en application millimétrique de finition sur un support conventionnel ils n'ont, a priori, qu'une fonction décorative.

## 3.2 - Les acteurs - la filière

### Les acteurs de la filière

Les différentes structures citées dans les précédents chapitres ont toutes un volet "Enduit de terre crue", notamment à travers les annuaires de professionnels qu'elles proposent. Il n'y a pas de structure spécialement dédiée à cette technique.

### La formation

De même que pour les acteurs, les formations proposées sur la terre crue, incluent le sujet des enduits.

Certaines structures peuvent proposer des formations spécifiques :

- L'Ecole Européenne de l'Art et des Matières d'Albi
- L'Ecole d'Avignon...

### Essais, études et recherches

Une thèse signalée parmi d'autres textes issus de la recherche :

Alves de Azeredo, G. - Mise au point de procédures d'essais mécaniques sur mortiers de terre : application à l'étude de leur rhéologie. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2005.

Dans le cadre du projet TERCRUSO en Midi-Pyrénées, une étude a été menée sur la caractérisation des enduits en vue d'un projet de norme sur les enduits en terre en 2011.

Deux tests, mis au point par l'ENTPE et publiés, sont à la disposition des maçons : l'un sur la teneur en argile et l'autre sur la qualité d'accroche au support.

Les essais pratiqués en laboratoire ne prennent que

rarement en compte les conditions de la réalité. Par exemple :

- les échantillons sont réalisés à plat ;
- les supports sont inadaptés (panneaux de béton de ciment) ou peuvent être mal préparés ;
- les éprouvettes sont de petites dimensions ;
- les conditions de test sont inadaptées au matériau testé ;
- les essais portent sur un seul paramètre très précis, les résultats sont difficiles à réintégrer dans le processus global...

Ces conditions d'essais en laboratoire rendent ainsi des résultats biaisés. Par exemple :

- le séchage des échantillons emprisonnés dans des moules est impossible (éprouvettes destinées à des tests de retrait, de résistance à la flexion et à la compression), il faut adapter la fabrication de ces échantillons ;
- les normes de référence des essais sont calibrées pour les mortiers hydrauliques, il faut adapter les appareils d'essais ou créer un nouveau montage adapté au matériau.<sup>23</sup>

## 3.3 - Les désordres recensés

La méconnaissance des Règles Professionnelles "Enduits sur supports composés de terre crue" ne facilite pas l'emploi des enduits à la terre crue et peut par ailleurs participer à la création de désordres nés de l'utilisation d'enduits inadaptés (voir deuxième partie de ce paragraphe). Dans leur grande majorité, les entreprises font toujours référence au NF DTU 26- 1 qui précise pourtant que les produits dont il y est question ne s'appliquent pas sur des maçonneries en terre crue.

### 3.3.1 - Les enduits en terre crue

La mauvaise préparation de l'enduit, une mise en œuvre inappropriée, un mauvais séchage sont autant de causes de désordres recensés sur des enduits en terre crue ; ceux-ci se manifestent de plusieurs façons : fissures, érosion, décollement de l'enduit ou apparition de moisissures.

#### Fissures et micro fissures

Une mauvaise formulation du mélange, rapport entre

23. Rémi DELINIERE - Caractérisation des produits de construction en terre crue dans la région Midi-Pyrénées - Approche expérimentale et analyse d'un projet de norme sur les enduits en terre - rapport de stage LRPC Toulouse - 2011.

liant et charge, provoque une micro fissuration lors du séchage. Si l'enduit est trop gras (trop chargé en argile) des fissures de retrait plus grosses peuvent apparaître. L'absence de renfort fibreux (toile de lin, ...), voire de lattis d'accrochage (roseau, ...), peut occasionner des fissures :

- à l'interface avec des pièces de bois intégrées au mur, notamment dans les constructions en torchis, en paille (défaut de mise en œuvre) ;
- sur des supports hétérogènes ;
- sur des supports mous (isolants fibreux, bottes de paille, ...);
- sur des surfaces exposées à de fortes charges ou à des vibrations.

Les fissures de retrait qui peuvent être importantes sont aussi provoquées par :

- l'application en couches trop épaisses ;
- un mortier préparé avec trop d'eau ;
- un séchage trop rapide et/ou un manque d'absorption du support : retrait de la surface vers l'intérieur ;
- un support très absorbant : retrait de la base vers l'extérieur de l'enduit ;
- un mortier travaillé trop profondément et trop longtemps en machine<sup>24</sup>.



Dégradation de l'enduit à la chaux sur un remplissage en terre paille, enduit trop épais, mal dosé sur un angle exposé aux intempéries (Crédit photo : Lucie Dautreppe et Charles Cintré)



Erosion de l'enduit : absence de protection en pied de mur (Source: AQC)

### Érosion, farinage, lessivage

Lors de la formulation des enduits et du dosage des ingrédients, la non prise en compte de l'orientation des façades et de leur éventuelle exposition aux intempéries peuvent conduire au farinage et à l'érosion du revêtement. L'absence de badigeon de finition sur un enduit de terre crue exposé aux intempéries peut entraîner son érosion.

L'application par temps de pluie peut, quant à elle, être responsable du lessivage de l'enduit.

### Décollement de l'enduit

De nombreuses causes peuvent être à l'origine du décollement de l'enduit. Une cause ponctuelle et locale qui n'est pas rapidement traitée, l'eau s'infiltrant entre l'enduit et la paroi, peut engendrer le décollement de l'enduit sur une surface importante laissant la paroi en terre crue au contact des intempéries. Ces causes de désordre peuvent se grouper en différentes familles :

- des défauts du support ou dans le support :
  - un support trop lisse entraîne un mauvais accrochage de l'enduit ;
  - la rétractation de pièces de bois mal séchées dans le mur provoque une micro fissuration à l'interface entre les matériaux, facilitant l'infiltration des eaux de pluie et provoquant à terme le décollement de l'enduit ;
  - la corrosion de pièces métalliques intégrées au support, provoque, outre des taches, le décollement ponctuel de l'enduit, l'infiltration des eaux de pluie et l'extension du décollement du revêtement ;
  - la purge insuffisante des anciens enduits et des éléments instables ;

24. Ulrich RÖHLEN et Christof ZIEGERT - Construire en terre crue. Construction, rénovation, finitions - LE MONITEUR, 2013.

- la présence de taches ou impuretés : suie, poussières, huile de coffrage, goudron, ...

- des défauts de mise en œuvre :

- le non-respect de l'épaisseur et du nombre de couches d'enduit ;

- l'application d'un enduit trop serré ;
- l'humidification du support dépend de sa nature :
- l'humidification insuffisante du support absorbant ne permet pas une bonne adhérence de l'enduit ;
- l'humidification du support non absorbant (fibre de bois, roseaux, ...) crée un film empêchant l'adhérence de l'enduit ;
- l'interposition sur le mur d'un grillage métallique d'accrochage rigidifie l'enduit.

- un mauvais séchage :

- l'application par temps très chaud, sec et venteux, sans protection.

### Moisissures

L'apparition de moisissures et/ou champignons est principalement liée à un séchage trop lent du revêtement, notamment dû à :

- l'application à une mauvaise saison (période à forte hygrométrie comme fin d'été et automne) ;
- le chauffage insuffisant ou inexistant en cas d'application hivernale ;
- la ventilation insuffisante ou inexistante.

Cela ne remet pas en cause les qualités de l'enduit, mais provoque un désordre esthétique notable ainsi qu'un éventuel risque sanitaire. Lorsque le séchage est complet, les supports sont nettoyés et le phénomène disparaît.

La germination d'éventuelles graines contenues dans la terre a également lieu en cas de séchage trop lent dans des conditions d'hygrométrie favorables. Lorsque la



Germination d'une graine présente dans l'enduit. (Source: AQC)

paroi est sèche, les plantules sont également sèches et disparaissent après nettoyage.

### Causes externes

Certains travaux annexes ou des situations particulières peuvent aussi engendrer des désordres sur les enduits en terre crue :

- un apport excessif d'humidité lors de la réalisation d'une chape peut provoquer l'apparition de sels en pied de murs intérieurs ;
- un débord de toiture insuffisant ou le manque de protection contre les rejaillissements (soubassement, bardage, ...), entraîne une usure prématurée des enduits ;

Il va sans dire que toutes les fuites, remontées capillaires ou venues d'eau indésirables de toute nature sur et dans les enduits participent à leur détérioration et à la fragilisation des parois en terre crue qu'ils sont censés protéger.

### Désordres spécifiques à différents supports de terre crue ou d'autres natures

- pisé : fissures dues à un support insuffisamment sec (retrait et tassement non terminés) ;
- terre allégée : fissures et défaut de séchage de l'enduit proviennent du manque de séchage du support ;
- enduit de terre crue ancien : décollement engendré par un nettoyage et une purge insuffisants des parties non adhérentes ;
- panneaux de terre crue : fissuration favorisée par le manque d'une bande de joint entre les panneaux ;
- panneaux de terre crue extrudés : gonflement et déformation provoqués par l'application d'une couche d'enduit trop épaisse ;
- blocs de béton cellulaire : fissures de retrait dues à l'absence de couche de primaire adapté (trop grande capacité d'absorption du matériau) ;
- béton : décollement causé par un séchage insuffisant, la présence d'huile de décoffrage, ou l'absence d'un primaire d'accrochage adapté ;
- enduit neuf : fissuration due à un séchage insuffisant ;
- enduit à la chaux ou au plâtre : décollement par manque de rugosité du support.

### 3.3.2. - Autres enduits : chaux hydraulique, ciment

Les enduits à la chaux fortement hydraulique (NHL 5) en couche épaisse (2 cm) ou l'enduit ciment, par leur

coefficient  $\mu$  élevé (entre 20 et 85), ne permettent pas la migration aisée de la vapeur d'eau.

Le blocage du transfert de vapeur d'eau (remontées capillaires) conduit à sa condensation derrière l'enduit au niveau du soubassement voire au niveau du bas du mur en pisé.

Si ce phénomène n'est pas rapidement découvert et une solution apportée, il peut mener à l'humidification

excessive de la paroi en terre crue, rendant la terre plastique jusqu'à l'effondrement.

L'utilisation d'enduit ciment, par son caractère rigide, ses faibles capacités en matière de transfert de vapeur d'eau, sa faible capillarité et porosité peut avoir un effet désastreux sur des constructions en terre crue. L'effet conjugué avec d'autres fragilités du bâti peut mener l'ouvrage à la ruine.



*Pisé humidifié sous plusieurs couches d'enduit ciment qui garde la trace du doigt.  
(Crédit photo: 2014 - Philippe Heitz - AQC)*



*Effondrement partiel d'un mur en pisé recouvert d'enduit ciment.  
(Source: Antoine Perrin - AQC)*

L'application d'enduit ciment sur les soubassements en pierre des murs en terre crue, provoque une accumulation d'humidité dans les murs en terre. La présence de l'enduit ciment sur la zone prévue pour l'évaporation des remontées capillaires (le soubassement), empêche celle-ci de se produire et guide l'eau par capillarité vers la paroi en terre, la gorgeant d'eau petit à petit jusqu'à détruire le pouvoir d'agglomération des argiles contenues.

Ce phénomène de fonte de la terre en pied de paroi mène à l'effondrement du mur.

Si l'enduit ciment recouvre également les parois en terre crue (pisé, torchis, bauge, adobe, ...), l'effet de mèche se propage et peut faire monter l'eau jusqu'aux pièces de charpente, participant ainsi à la pourriture des têtes de solives de plancher et des sablières ou toutes autres pièces de bois intégrées à la maçonnerie.

La fissuration horizontale de l'enduit est un signe de fonte de la terre, notamment sur un mur en pisé, et doit être considérée comme une alerte majeure avant sinistre. D'autres symptômes comme :

- le gonflement de l'enduit, est le signe d'une humidité excessive contenue dans la paroi ;
- l'éclatement de l'enduit qui peut se produire avant l'effondrement de l'ouvrage.

En règle générale, l'utilisation d'enduit ciment sur des parois en terre crue provoque un certain nombre de désordres dus non seulement au mauvais transfert de vapeur d'eau mais également à la rigidité du matériau appliqué sur le support plus souple qu'est la terre.

L'application d'enduit ciment en intérieur, anéantit l'effet hygroscopique de la terre crue ; le revêtement se comporte comme un pare-vapeur, l'humidité produite dans le logement en période hivernale n'a pas de possibilité de s'évacuer à travers les parois, créant ainsi une sensation de froid humide à l'intérieur du logement. Une ventilation et une forte aération l'été participent à diminuer l'humidité interne (provenant surtout des remontées capillaires et aussi du peu d'humidité produite par les occupants) mais ne peut résoudre un problème majeur d'humidité.

En cas de fissure ou de perforation dans le revêtement en enduit ciment, la vapeur d'eau pourra s'infiltrer et se condenser dans l'épaisseur de la paroi, constituant une source de désordre caché.

### 3.4 - Conclusion

La grande majorité des professionnels interrogés a signalé l'emploi des enduits ciment comme une source majeure de désordres voire de sinistres.

Les rénovations pratiquées depuis les années 1970/80 sur des constructions en terre crue (quelle que soit la technique) avec des matériaux conventionnels comme les enduits ciment, les isolants synthétiques, sont à l'origine d'un grand nombre de sinistres.

Les professionnels non avertis des qualités et des limites de la terre crue continuent, malgré la parution des Règles Professionnelles "Enduits sur supports composés de terre crue"<sup>25</sup> en 2013, d'employer les enduits ciment en rénovation de bâti en terre crue ou en pierre appareillée à la terre.

La méconnaissance même de la présence de parois en terre crue ne favorise pas l'emploi de matériaux adaptés à la réhabilitation de ce type d'édifices.

Les enduits à la terre crue sont essentiellement utilisés en intérieur et ne sont donc pas soumis aux intempéries, même si leur emploi dans des pièces humides nécessite des précautions particulières. Leur emploi peut occasionner quelques désordres de type fissures ou décollement mais uniquement en cas de préparation défectueuse du mélange, de mauvaise mise en œuvre ou de préparation insuffisante du support.

Que ce soit en extérieur ou en intérieur, sur des supports en terre crue ou sur d'autres supports, l'application des Règles Professionnelles "Enduits sur supports composés de terre crue" permet d'éviter tout désordre, leur plus large divulgation bénéficierait à la préservation du patrimoine bâti en terre crue.

**Nous vous invitons à consulter les Guides de bonnes pratiques des enduits en terre crue.**

25. Enduits sur supports composés de terre crue - Règles Professionnelles - ECOBATIR, LE MONITEUR, 2013.

## 4. CONCLUSION

La majorité des désordres recensés lors de cette étude est due à des interventions extérieures ou à des causes exogènes. Ces causes touchent l'ensemble du bâti ancien qu'il soit constitué de terre crue ou de pierre. Les conséquences de ces causes se développent plus rapidement et peuvent être plus facilement visibles sur le bâti en terre crue rendu plus sensible, notamment par rapport à l'eau et l'humidité, en raison des qualités et capacités hygroscopiques du matériau terre.

Cependant, le bâti en terre crue dument protégé, régulièrement entretenu et correctement rénové, peut atteindre une grande longévité, quelle que soit la technique de construction, en témoignent un grand nombre d'édifices très anciens, bâti commun ou monuments historiques, en parfait état.

La réhabilitation du bâti ancien avec des produits conventionnels pose des problèmes de compatibilité de matériaux et de techniques.

En effet, les connaissances sur le fonctionnement d'une paroi ancienne ne sont pas toujours bien maîtrisées par tous les intervenants. Les problèmes que peuvent poser les transferts de vapeur d'eau sur une paroi isolée sont d'autant plus cruciaux que le matériau constituant cette paroi peut être fragilisé par l'eau et l'excès d'humidité.

Que ce soient les techniques porteuses (adobe, bauge, pisé) ou les techniques de remplissage (terre-paille, torchis), le manque d'entretien, le manque de connaissances et les défauts de mises en œuvre peuvent être fatals au matériau terre.

Il apparaît que le manque de connaissances et de savoir-faire favorise le développement des désordres et sinistres.

La formation initiale des professionnels, tant au niveau de la conception qu'au niveau la réalisation, permettrait d'éviter certaines erreurs dues à la méconnaissance des spécificités du matériau terre. La sensibilisation de tous les acteurs de la réhabilitation, notamment énergétique, à la présence de terre dans les constructions qu'ils sont amenés à traiter devrait empêcher l'emploi de méthodes inappropriées et de matériaux inadaptés.

Cette ignorance du matériau, de ses caractéristiques et des modalités de sa mise en œuvre par une grande partie des acteurs (collectivités, agents territoriaux, maîtres d'ouvrage, habitants, professionnels) contribue, par manque d'intérêt, au déficit de formation des différents professionnels de la construction et par là même, tend à créer des situations de désordres potentiels. Notamment par la rehausse des sols extérieurs (trottoirs, chaussées)

qui réduisent la hauteur des soubassements donc de la surface d'évaporation des remontées capillaires ; les rehausses successives pouvant même enterrer les soubassements. Par l'imperméabilisation, des sols extérieurs (enrobés bitumineux, pavés sur lit de béton de ciment, gravillons lavés, sols ciment, ...) empêchant l'évaporation des eaux de pluie qui migrent dans les soubassements et ne peuvent pas toujours s'évaporer aisément.

Même si de plus en plus de professionnels, compétents dans chacune des techniques de construction en terre crue, ont permis de conserver les connaissances et savoir-faire liés aux différentes pratiques, en mettant en place des formations, en proposant des chantiers participatifs ou un apprentissage "sur le tas", ils ne sont pas assez nombreux pour relever le défi de la préservation de l'important patrimoine et pour infléchir la progression de l'utilisation de la terre crue à travers ces différents aspects.

Cependant, depuis quelques années, les enduits à la terre crue suscitent un regain d'intérêt auprès du grand public, entraînant petit à petit vers d'autres pratiques de la terre crue.

Afin que les contre-exemples ne nuisent pas à l'évolution de l'utilisation de la terre crue, il est nécessaire de préconiser l'emploi de ce matériau pour des usages adaptés et dans de bonnes conditions de réalisation, un des objectifs du travail de rédaction des Guides de bonnes pratiques. Les guides, prévus fin 2018 permettront de prévenir les pathologies identifiées dans cette étude.

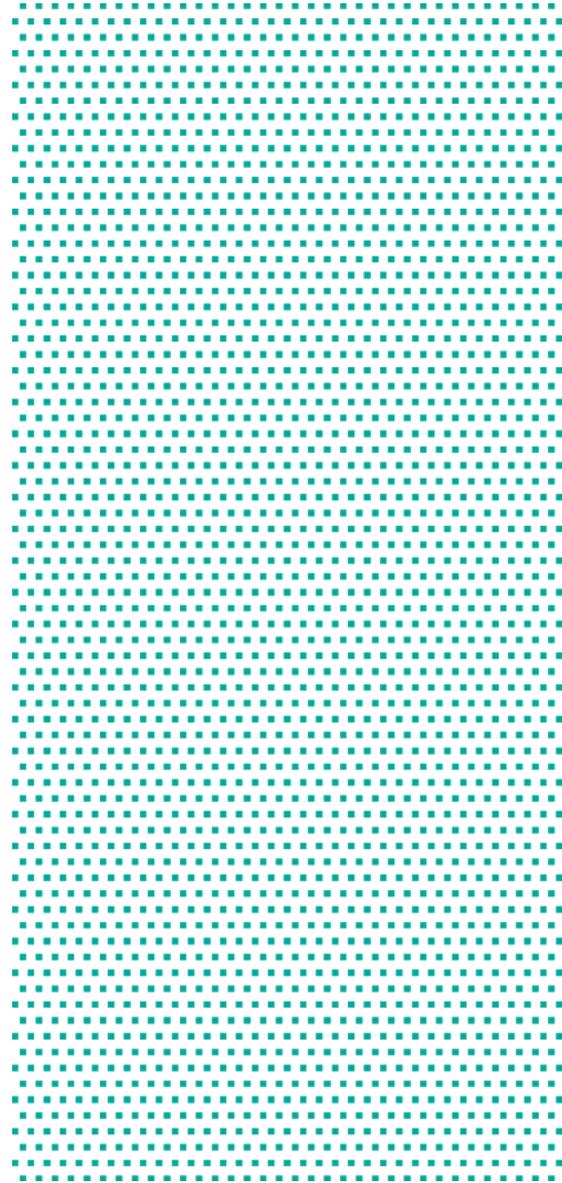
D'autres produits et techniques issus de la recherche peuvent apporter des ouvertures pour la construction en terre crue tout en respectant ses principales qualités que sont une hygroscopicité élevée, une grande résistance à la compression, un bilan carbone très favorable, un réemploi quasiment indéfini ou un retour à la terre sans dommage en fin de vie du bâtiment. Ces qualités sont préservées dans la mesure où les adjuvants qui lui sont apportés pour améliorer ses performances modifient sa composition mais pas son comportement physico-chimique.

Certains de ces produits sont stabilisés comme les BTC (sauf demande expresse au fabricant), d'autres se rapprochent de techniques conventionnelles telles que la terre coulée qui pourrait remplacer le béton de ciment (l'agrégat est la terre au lieu du sable, technique très intéressante pour les industriels compte-tenu de l'état des réserves de sable) ou le béton d'argile qui fait l'objet d'actives recherches actuellement.

Ces produits, prêts à l'emploi, outre un comportement physico-chimique différent (hygroscopique et structurel) de celui de la terre crue, nécessitent une infrastructure de fabrication plus importante, des transports ; ils ne sont donc plus tout à fait en adéquation avec l'empreinte écologique d'un matériau local en filière courte.

La préfabrication de blocs de terre crue ou de terre-paille, de panneaux de bauge, de pisé ou de terre-paille par le professionnel ou en petites unités locales, facilite la mise en œuvre et ouvre la possibilité de construction pendant toute l'année sans rencontrer le problème de la qualité du séchage, puisque celui-ci aura eu lieu dans des conditions d'atelier.

Malgré tout, tant que le contexte réglementaire ne prendra pas en compte la spécificité de ce matériau, le développement de la construction en terre crue restera réservée à quelques professionnels correctement formés. Tant que ses qualités structurelles en compression ne seront pas reconnues et validées par les textes, tant que la rénovation énergétique du bâti ancien passera par la réglementation "élément par élément", tant que les essais en laboratoires ne seront pas spécialement adaptés à ce matériau, ces difficultés d'emploi subsisteront.



# ANNEXES

## ANNEXE 1 : TABLEAU SYNTHÉTIQUE DE PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

	DÉNOMINATION	TECHNIQUE	COMPOSITION	ÉPAISSEUR MOYENNE DES PAROIS
TECHNIQUES PORTEUSES	ADOBE BRIQUE TERRE CRUE	Murs porteurs Cloisons	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre (argilo-limoneuse)</li> <li>• Eau</li> <li>• Fibres, si la qualité de la terre le nécessite (paille hachée, aiguilles de pin, brindilles, soies de porc, ...)</li> </ul> <p>Les fibres : 10 à 20 kg/m<sup>3</sup> ou 30% du volume fini</p>	5 à 30 cm : cloison 50 cm et plus : mur porteur
	BAUGE	Murs porteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre (limono-argileuse)</li> <li>• Fibres végétales ou animales : paille de blé, d'orge ou d'avoine, roseau, bruyère, crin, ...</li> <li>• Eau (de 20 à 35 %)</li> <li>• Sable éventuellement suivant la qualité de la terre</li> </ul>	50 à 80 cm
	PISÉ	Murs porteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre (88 à 92 %)</li> <li>• Eau (8 à 12 %)</li> </ul>	50 cm
	BTC BRIQUE DE TERRE COMPRESSÉE	Remplissage Cloisons Murs porteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre</li> <li>• Chaux hydraulique et/ou ciment</li> <li>• Eau</li> </ul>	9 cm et ses multiples pour une paroi plus épaisse
	BRIQUE EXTRUDÉE	Cloisons Murs intérieurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre</li> <li>• Eau</li> </ul>	
TECHNIQUES DE REMPLISSAGE	TERRE- PAILLE	Remplissage Doublage isolant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre argileuse (10 à 20 % en volume)</li> <li>• Paille (80 à 90 % en volume)</li> <li>• Eau (sous forme de barbotine)</li> </ul>	35 cm : remplissage 15 à 20 cm : cloison 10 à 15 cm : doublage
	TORCHIS	Remplissage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre argilo-limoneuse</li> <li>• Fibres végétales, parfois animales</li> <li>• Eau (25 % environ)</li> <li>• Sable ou gravier si la qualité de la terre le nécessite</li> </ul>	8 à 15 cm jusqu'à 25 cm
ENDUITS	ENDUIT	Mortier	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre</li> <li>• Eau</li> <li>• Eventuellement : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sable</li> <li>• Pigments</li> <li>• Fibres (végétales ou animales)</li> <li>• Chaux aérienne ou hydraulique</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corps d'enduit : de 5 à 30 mm</li> <li>• Finition : de 3 à 25 mm</li> <li>• Renformis et gobetis : épaisseur suivant nécessité</li> </ul>

TYPE DE MISE EN OEUVRE	PRÉFABRICATION	EXTENSION GÉOGRAPHIQUE
<p>Petits éléments de terre crue moulée et séchée Maçonnerie de <b>petits éléments assemblés</b> au mortier de terre crue sur un soubassement en pierres ou briques</p>	<p>Oui</p> <p>Produits dérivés :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• BTC : bloc de terre comprimée la plupart du temps stabilisée à la chaux hydraulique (ou au ciment)</li> <li>• Brique extrudée : brique destinée à être cuite, sortie de la ligne de fabrication avant cuisson</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sud-Ouest (Gascogne)</li> <li>• Champagne (Montagne de Reims, Briennois, ...)</li> <li>• Auvergne (Riom, Limagne, ...)</li> <li>• Île de France</li> </ul>
<p>Sur un soubassement en pierres ou briques, levées successives à la fourche ou à la main d'environ 60 cm sur toute la périphérie de la construction Construction <b>monolithique sans coffrage</b>, les parois sont dressées avec un paroir pour rectifier la planéité du parement</p>	<p>Possible :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Panneaux de grandes dimensions préfabriqués en atelier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basse Normandie et Bretagne</li> <li>• Oise et Somme</li> <li>• Pays de Loire, Poitou-Charentes, Vendée</li> <li>• Midi-Pyrénées</li> <li>• Camargue</li> </ul>
<p>Sur un soubassement en pierre, la terre est damée par couches successives entre deux coffrages Construction <b>monolithique coffrée</b>, les banches sont retirées dès que la portion de mur est montée, le parement est fini</p>	<p>Possible :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Panneaux de grandes dimensions préfabriqués en atelier</li> </ul> <p>Produits dérivés :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terre stabilisée - terre coulée</li> <li>• Ciment d'argile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quart sud-est de la France : Val de Saône, Bresse, Bugey, Dauphiné, Forez, Livradois, Lyonnais, Couloir rhodanien, Basse Durance, Comtat Venaissin</li> <li>• Beauce</li> <li>• Champagne</li> <li>• Limousin</li> <li>• Bretagne</li> <li>• Vallée de la Garonne</li> </ul>
<p>Petits éléments de terre crue, stabilisée, compressée et séchée Maçonnerie au mortier stabilisé</p>	<p>Produit semi-industriel à industriel</p>	<p>Tout le territoire</p>
<p>Brique destinée à être cuite, retirée de la chaîne de fabrication avant cuisson</p>	<p>Produit semi-industriel à industriel</p>	<p>Tout le territoire</p>
<p><b>Remplissage entre coffrage autour d'une ossature porteuse</b> en bois</p>	<p>Possible :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Blocs (exemple : petit blocs 24 x 11 x 7 - gros blocs 30 x 24 x 11 cm) maçonnés au mortier de terre ou de chaux</li> <li>• Panneaux (épais de 6 à 12 x 80 x 30 cm - minces de 1,6 à 3,5 x 120 x 30 à 60 cm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tout le territoire mais essentiellement dans la moitié sud, en remplissage d'ossature bois porteuse</li> <li>• Nord, Champagne, Alsace : en complément d'isolation et remplissage de colombages</li> </ul>
<p><b>Remplissage</b> sur une structure d'accrochage d'<b>une ossature porteuse</b> (pan de bois ou colombage)</p>	<p>Voir blocs et panneaux de terre allégée</p>	<p>Pans de bois apparents (le torchis remplit l'ossature),</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alsace, Lorraine, Champagne, Franche-Comté, Bourgogne, Lyonnais, Normandie, Bretagne, Orléanais, Bourbonnais-Nivernais, Maine, Berry, Gascogne, Pays Basque</li> </ul> <p>Pans de bois cachés, (le torchis remplit l'ossature et couvre le pan de bois)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normandie, Champagne région du Porcien, Picardie, Artois</li> </ul>
<p><b>Mortier</b> appliqué à la main ou à la machine en protection et finition (décoration) de murs en terre crue ou autres matériaux, en parois extérieures ou intérieures</p>	<p>Certains produits peuvent être préformulés</p>	<p>Tout le territoire</p>

## ANNEXE 2 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DÉSORDRES LIES A L'HUMIDITÉ

DÉSORDRES RECENSÉS	
	Méconnaissance de la présence du matériau terre de la part des différents intervenants (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise, ...), y compris services techniques territoriaux (rehausse et imperméabilisation des chaussées)
	Méconnaissance du matériau, de ses caractéristiques et des Règles Professionnelles Enduits sur Supports en Terre Crue
	Manque de formation et/ou d'information des différents acteurs (maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, entreprise, bureau de contrôle, ...)
Humidité des pieds de murs et des murs	
SOL EXTÉRIEUR ET SOUBASSEMENT	Rehaussement des sol extérieurs - disparition du soubassement : réduction de la surface d'évaporation des remontées capillaires - réduction de la protection des eaux de rejaillissement. Les sols peuvent subir des remblais successifs qui réduisent voire enterrent le soubassement, mettant la terre crue ou la sablière basse en contact direct avec l'humidité environnante du sol et les rejaillissements de la pluie (les causes de remblais sont multiples : terrassement pour extension, construction voisine, modification de voirie, creusement d'une piscine, réalisation d'une terrasse, ...).
	Soubassement de hauteur insuffisante : remontées capillaires, rejaillissement des eaux de pluie
	Imperméabilisation des sols extérieurs : remontées capillaires (trottoirs, chaussées et abords en béton de ciment, enrobé de bitume, pavés scellés sur chape ciment, ...)
	Modification des abords de la construction : inversion de la pente du terrain, réalisation de tranchées (fossés, talus), construction contigüe, plantations, ...
	Modification en sous-sol : déviation d'un fil d'eau, canalisations enterrées défectueuses (fuites invisibles)
	Mouvements naturels de terrain (argiles gonflantes, ...)
	Mauvais drainage des abords
	Traitement inadapté des eaux de ruissellement : milieux étanches fissurés, concentration de l'eau
	Végétation proche des murs : arbres, arbustes, bacs à plantes avec arrosage régulier, ...
	Mauvais entretien du soubassement
	Enduit ciment sur soubassement : remontées capillaires - voir tableau "Enduits"
	Cristallisation des sels contenus dans les remontées capillaires : efflorescence de salpêtre
	Absence de la barrière aux remontées capillaires en construction neuve
	Imperméabilisation des sols intérieurs : dalle béton sur film étanche, carrelage sur chape ciment, ...
	Construction contre un mur en terre crue emprisonnant de l'eau entre les parois contigües
	Défaut de protection des façades exposées
	Infiltration d'eau entre les éléments de construction
Décollement de l'enduit : condensation sur le parement en terre - voir tableau "Enduits"	
Infiltrations d'eau derrière l'enduit : dégradation invisible - voir tableau "Enduits"	

ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
•	•	•		•		
•	•	•		•	•	
•	•	•	•	•	•	
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
•	•	•		•		
•	•	•	•		•	
•	•	•		•		
	•	•				
	•					
	•			•		
		•				
•	•	•				
	•					
		•				
•						
	•		•			
•	•	•		•		
		•				
•	•	•	•	•		
•					•	
•						
	•					

## ANNEXE 2 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES LIES A L'HUMIDITE

Humidité des pieds de murs et des murs	
MURS ET SOL INTÉRIEUR	Réhabilitation, réparation avec des matériaux hétéroclites au comportement hygrométrique différent : - modifient le comportement hygrométrique du mur - peuvent aggraver le désordre (propagation sur l'autre partie du mur si réparation sur une demi-épaisseur)
	Inadaptation de l'isolation thermique des parois en ITE ou ITI : isolants et parements étanches à la vapeur d'eau, rigidité des matériaux,
	Enfermement du mur existant laissé en l'état par un doublage isolant ou non
	Parements intérieurs étanches à la vapeur d'eau : enduits, doublages, peinture, revêtements collés, ...
	Absence ou insuffisance de ventilation
	Manque d'entretien des murs pendant de longues périodes, abandon des bâtiments : mènent à l'effondrement (perte de savoir faire, perte d'intérêt pour le matériau, ...), .
	Dégagement du pan de bois pour le rendre apparent : bois fragiles à l'eau destinés à rester protégés
	Sinistre incendie sur propriété voisine : arrosage des ouvrages en terre, stockage de déblais humides
COUVERTURE	Manque d'entretien de la couverture : fuites d'eau dans les murs
	Manque d'entretien des zingueries : chéneau, descente d'eau, raccordement sur égout pluvial, ...
	Absence de descente d'eau : mauvaise récupération des eaux de pluie
	Modification de toiture avec dépose et construction de dalles béton : l'eau du béton et/ou l'eau stagnante sur la dalle en cas d'absence de couverture est transmise aux parois en terre
Erosion superficielle de parois sans protection exposées aux intempéries	
Erosion de ruissellement : exposition aux vents dominants, les pluies ruissellent sur les murs, emportant quelques particules de terre et réduisent peu à peu l'épaisseur des parties exposées. Les murs étaient autrefois protégés par un enduit pelliculaire à la terre ou à la chaux. Sans un entretien régulier adapté permettant de regarnir le mur, l'érosion va accentuer les fissures, creusements et autres cavités. Le moindre défaut dans la planéité de la surface entraîne une turbulence du vent qui a tendance à accentuer le désordre.	
Fonte des briques sur les parois exposées : infiltration d'eau entre les éléments de construction. Situation aggravée si la maçonnerie est réalisée avec un mortier de nature différente (chaux, ciment)	
Situation aggravée si la maçonnerie est réalisée avec un mortier de nature différente (chaux, ciment)"	
Rejaillissement des eaux de pluie	
Dégradation du mur gouttereau (à environ 1 mètre sous la toiture) : débord de toiture trop court, insuffisance de protection aux intempéries, manque d'entretien du parement	
Usure et dégradation du mur à la limite du soubassement	
Remontées capillaires : dépôt de salpêtre attire les animaux qui ont tendance à lécher les murs, usant la paroi toujours au même niveau au-dessus du soubassement	
Soubassements revêtus de matériaux imperméables à la vapeur d'eau empêchant l'évaporation des remontées capillaires qui migrent dans la paroi en terre	
Lessivage ponctuel de la terre	
Mauvais entretien des toitures et zingueries : fuites dans et sur les parois entraînent l'usure de la paroi.	
Suppression des débords de toiture : érosion de la terre (pour y remédier l'enduit est apparu : enduit batard ou enduit ciment notamment. Disparition des toitures en chaume depuis 100 à 150 ans)	

ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
.	.	.		.		
.	.	.				
	.			.		
	.	.				
	.					
	.			.		
		.				
.	.	.		.		
.		.		.		
	.			.		
		.				
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
.	.	.		.		
.						
.						
.	.	.				
.	.	.				
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
.	.	.				
		.				
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
.						
	.					

## ANNEXE 2 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES LIES A L'HUMIDITE

<b>Perforation des parois</b>
Cavités creusées par des insectes dans des parois rendues fragiles par une humidité excessive. Les oiseaux peuvent agrandir ces cavités en allant picorer les insectes et des rongeurs peuvent y creuser des galeries et y nicher
<b>Pourrissement des bois de charpente et de plancher</b>
Fuites en toiture : modification de la répartition des charges, déséquilibre sur une paroi fragilisée par le lessivage de la terre au droit des fuites
Étanchéité des sols et des murs empêchant l'évaporation des remontées capillaires qui peuvent migrer jusqu'aux solives de plancher
Erosion excessive de la paroi
<b>Apparition de champignons type mэрule ou conioaphore</b>
Doublets isolants avec lame d'air : enferment le mur en l'état (matériaux imperméables à la vapeur d'eau) intégrant des pièces de bois. Humidité, température, obscurité, absence de ventilation, cellulose : conditions de développement des champignons
<b>Apparition de moisissures</b>
Défaut de protection des ouvrages pendant la réalisation avec épisodes pluvieux
Mauvaise qualité de la terre (terre végétale, terre trop liquide, ...)
Mauvaise qualité des fibres : trop courtes, dégradées
Paille humide (mauvaise conservation à plus ou moins long terme suivant la qualité de la paille)
Mauvais enrobage des fibres : barbotine trop liquide, trop peu de terre
Temps de séchage trop long : murs trop épais, mélange trop humide, mauvaise ventilation
Séchage contrarié : pose des menuiseries, pose des revêtements, manque de ventilation
Mélange compacté trop humide - manque de repos du mélange
Mise en œuvre à la mauvaise saison (intempérie - froid)
Défaut de protection sur des façades mal exposées
Débord de toiture trop court (développement de lichens)
Doublets isolants avec lame d'air : enferment le mur laissé en l'état
<b>Pourriture et dégradation ponctuelle du mur</b>
Non réalisation ou mauvaise réalisation d'ouvrages annexes : relevé d'étanchéité, enduit extérieur, pare-pluie sans bardage, remontées capillaires par l'enduit sans garde au sol, absence de rupture de capillarité, absence de lisse basse pour la pose de l'ossature bois, trop faible débord de toiture, appuis de fenêtre non étanches, ...
<b>Germination de graines</b>
Terre contenant encore quelques grains de céréales qui peuvent germer (lorsque les pousses sont sèches le mur l'est aussi - c'est un bon indicateur)
<b>Corrosion d'éléments métalliques</b>
Clous, tiges, grillages posés dans des réparations, toute pièce métallique intégrée au torchis et atteinte par l'humidité.

ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
	•					
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
•	•					
	•					
	•					
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
	•			•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
				•		
			•	•		
			•	•		
			•			
			•			
			•			
			•	•		
			•			
			•			
	•					
	•			•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
			•			
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
			•	•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
				•		

## ANNEXE 2 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES LIES A L'HUMIDITE

<b>Dégradation du pan de bois</b>
Mauvaise gestion des eaux de pluie : fuites en toiture, chéneaux et descentes d'eau bouchés ou percés, ... (désagrégation et gonflement du torchis)
Mauvais fonctionnement hygrométrique de la paroi : l'ossature et le remplissage sont atteints ensemble
Moyenne ou mauvaise qualité des essences de bois mises en œuvre : bois sensibles à l'humidité, aux insectes xylophages
<b>Desquamation du torchis</b>
Gel dans la masse : saison de réalisation et temps de séchage inadaptés au site ou à la région
<b>Décollement du torchis</b>
Mauvais accrochage sur le lattage : support trop lisse, trop sec, mélange trop sec
<b>Fissuration et affaissement de la paroi</b>
Mise en œuvre dans des conditions d'humidité importante (mauvaise saison, ventilation insuffisante)
Mise en œuvre de briques insuffisamment sèches (retrait au séchage avec fissuration)
<b>Gonflement des éléments de construction</b>
Humidification du support trop importante et/ou mise en œuvre avec un mortier trop humide
<b>Facteurs aggravants voire déclencheurs de sinistre sur une structure fragilisée</b>
Vibrations : circulation routière (et aérienne), travaux de terrassement, de démolition, ...
Amplitudes météorologiques excessives : sécheresses, pluies importantes et violentes, gel/dégel, ...

ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
				•		
				•		
				•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
				•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
				•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
					•	
					•	
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
						•
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
	•	•				
	•	•				

## ANNEXE 3 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES STRUCTURELS ET CONSTRUCTIFS

DÉSORDRES RECENSÉS
Méconnaissance du matériau et de ses caractéristiques
Manque de connaissance des capacités porteuses de la terre
Manque de formation et/ou d'information des différents acteurs (maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, entreprise, bureau de contrôle, ...)
<b>Fissuration d'angle - Ecartement des murs</b>
Tassement de terrain : ruissellement d'eau, creusement de fossé, mise à jour de la fondation, ...
Déstabilisation du terrain avoisinant : creusement des fondations d'une extension, d'une piscine, construction d'une terrasse
Faiblesse ou défaut de harpage des murs contigus (peut mener à l'effondrement partiel ou total du mur)
Modification de la charpente ou des planchers, modification des façades
Suppression des entrants de charpente : aménagement de combles, gain de volume utilisable
<b>Fissuration verticale</b>
Tassements différentiels : <ul style="list-style-type: none"> <li>• creusement en sous-œuvre (cave, piscine, ...),</li> <li>• modification de la portance du sol (assèchement de terrain, argiles gonflantes, ...)</li> </ul>
Fondations et dallages rigides (béton de ciment) pour des murs en terre plus souples : contraintes différentielles de mouvement, manque d'homogénéité de l'ensemble et manque de souplesse des infrastructures
Mauvaise mise en œuvre d'origine : fondations insuffisantes, murs trop élancés, débords de toiture trop faibles, ...
Poussée latérale de la charpente sur les murs : modification des descentes de charges de la toiture, suppression des entrants pour aménagement de combles
Poinçonnement : modification de la répartition des charges de charpente ou de plancher, absence de sommier sous les appuis de charpente
Cisaillement : mauvaise répartition des charges de toiture, modification de charpente
Ouverture de baies trop larges et/ou mal situées, linteaux mal dimensionnés, section trop faible de la structure porteuse, ... (fissures diagonales)
Oubli du joint de fractionnement en construction neuve
Accrochage mal situé, trop superficiel ou inadapté d'ouvrages rapportés : cheminée, escalier, terrasse, ...
<b>Fissuration</b>
Médiocrité des maçonneries de soubassement
Maçonneries confinées dans des cadres en béton : tassements différentiels et fissuration (réponse aux règles parasismiques)
Instabilité de l'ossature par manque de renfort au moment de la restauration
Fissuration à l'interface terre/bois - terre/béton - terre/brique - ... notamment au pourtour des châssis (portes, fenêtres), poteaux, linteaux ou tous ouvrages insérés dans le mur en terre crue et non ou mal relié
Insertion de matériaux hétéroclites, rigides et lourds : parpaings, béton, béton cellulaire, briques de terre cuite, pierre, bois, polyuréthane, coffrets électriques, boîtes d'encastrement, ... : <ul style="list-style-type: none"> <li>• modifie l'homogénéité de résistance mécanique du mur</li> <li>• modifie le comportement hygrométrique du mur</li> <li>• peut aggraver le désordre (propagation sur l'autre partie du mur si réparation sur une demi-épaisseur)</li> <li>• déformation de la structure</li> </ul>
Linteau trop faible (fissuration diagonale)
Mauvais dosages du mélange : proportion terre/adjuvant (fissuration ou décollement du torchis), trop d'argile dans le mélange, mélange trop humide, séchage trop rapide (exposition au soleil ou au vent)

ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
.	.	.	.	.		
		.				
.	.	.	.	.	.	
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
	.					
	.					
.						
	.					
.						
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
.	.	.				
.					.	
.						
	.	.		.		
.	.	.				
	.					
.	.	.				
.	.	.		.		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
	.					
.		.			.	
				.		
	.	.		.		
	.	.		.		
	.	.		.		
	.	.		.		
				.		
				.		

## ANNEXE 3 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES STRUCTURELS ET CONSTRUCTIFS

Taux d'hygrométrie des bois d'ossature différent du taux d'hygrométrie du mélange terre-paille : au séchage, peut provoquer un très léger rétrécissement de la structure entraînant une fissuration dans les enduits de finition

### Fissuration horizontale

Dans l'enduit en pied de mur à la jonction du soubassement : signe de la fonte du pisé dû à l'humidité excessive - voir tableau "Enduits"

Recouvrement insuffisant des lattes par le torchis

### Micro fissuration

Mise en œuvre de bauge trop humide, épaisse ou argileuse : fissures régulières verticales ou diagonales localisées sur une levée (fragilité locale)

Mauvaise jonction des blocs dans la technique du pain de terre : lits de micro fissuration

### Bombement, flambement des murs

Modification des descentes de charge : surcharge d'occupation, dépose de toiture et réalisation de dalles béton

### Déchaussement d'éléments de construction

Emploi de mortier d'une autre nature que la terre crue : micro fissuration, infiltration d'eau entre les éléments de construction, fonte de la terre crue des briques, ...

### Perte de verticalité

Modification des descentes de charge : surcharge d'occupation, dépose de toiture et réalisation de dalles béton

### Erosion de la terre

A la jonction avec d'autres matériaux plus durs composant la paroi (bois, terre cuite, pierre, béton de ciment, ...)

### Déformation de l'ossature, déstabilisation

Tassement de terrain : ruissellement d'eau, creusement de fossé, mise à jour de la fondation, ...

Déstabilisation du terrain avoisinant : creusement des fondations d'une extension, d'une piscine, construction d'une terrasse

Section de poteau ou poutres ou tout élément de charpente modifie de régime des charges : gain de volume utilisable

Ouverture de baie mal située ou trop importante : découpe des bois d'ossature, position en angle, superposition

Défaut ou suppression du contreventement

Décloisonnement pour augmentation et modification du volume habitable sans tenir compte de la logique du pan de bois

Surcharge de plancher : mauvaise utilisation de la construction

Insertion de matériaux lourds et non appropriés : isolation, réparation, ...

### Autres désordres

Micro-fissuration aux jonctions mur/fenêtre et mur/toiture : nuit à l'étanchéité à l'air de la construction

Aspect irrégulier du torchis : espacement trop important entre les lattes ou torchis trop plastique et trop peu fibré

Déformation des fondations : alourdissement des murs sur des fondations légères par apport de matériaux lourds et inadaptés (parpaings, béton, brique, ...)

Mauvaise adhérence entre brique et mortier : manque d'humidification du support

Tassement de la paroi : exécution trop rapide des maçonneries, temps de séchage insuffisant

Mauvaise résistance au poinçonnement des sols en terre

			•			
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
		•				
				•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
	•					
	•					
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
•		•				
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
•					•	
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
•		•				
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
•	•					
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
				•		
				•		
				•		
				•		
				•		
				•		
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	BTC	BRIQUE EXTRUDÉE
			•			
				•		
				•		
•					•	
	•				•	

## ANNEXE 4 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES DES ENDUITS

DÉSORDRES RECENSÉS
<b>LES ENDUITS EN TERRE CRUE</b>
<b>Fissuration d'angle - Ecartement des murs</b>
Mauvaise formulation du mélange : proportion liant/charge - enduit trop gras ou préparé avec trop d'eau
Absence de renfort fibreux (toile de lin, ...) ou de lattis d'accrochage (roseau, ...) :
<ul style="list-style-type: none"> <li>• fissures à l'interface avec des pièces de bois intégrées au mur</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• supports hétérogènes : changement de matériaux, façades volets roulants, linteaux béton, ...</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• supports mous : isolants fibreux, bottes de paille, ...</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• surfaces exposées à des fortes charges ou à des vibrations</li> </ul>
Application en couches trop épaisses
Séchage trop rapide et/ou manque d'absorption du support : retrait de la surface vers l'intérieur
Support très absorbant : retrait de la base vers l'extérieur de l'enduit
Mortier travaillé trop profondément et trop longtemps
Application par temps très chaud, sec et venteux, sans protection
<b>Erosion - farinage - lessivage</b>
Non prise en compte de l'orientation des façades lors de la formulation du mélange
Application par temps de pluie : lessivage de l'enduit
Absence de badigeon de finition sur une façade exposée
Débord de toiture insuffisant ou manque de protection contre les rejaillissements (soubassement, bardage, ...) : usure prématurée des enduits
<b>Défauts du support ou dans le support :</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• support trop lisse : mauvais accrochage de l'enduit</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• rétractation de pièces de bois mal séchées dans le mur : micro fissuration à l'interface entre les matériaux, infiltration des eaux de pluie et décollement de l'enduit</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• corrosion de pièces métalliques intégrées au support, provoque, outre des taches, le décollement ponctuel de l'enduit, l'infiltration des eaux de pluie et l'extension du décollement du revêtement"</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• purge insuffisante des anciens enduits et des éléments instables</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• taches ou impuretés : suie, poussières, huile de coffrage, goudron, ...</li> </ul>



## ANNEXE 4 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES DES ENDUITS

Défauts de mise en œuvre :
• non respect de l'épaisseur et du nombre de couches d'enduit
• application d'un enduit trop serré
• humidification insuffisante du support : mauvaise adhérence de l'enduit
• humidification de support non absorbant crée un film empêchant l'adhérence (fibre de bois, roseaux, ...)
• interposition sur le mur d'un grillage métallique d'accrochage : rigidifie l'enduit
Mauvais séchage :
• application par temps très chaud, sec et venteux, sans protection
Infiltrations d'eau derrière l'enduit suite à détérioration ponctuelle de l'enduit, fuite en toiture, ... : dégradation invisible
<b>Moisissures</b>
Mauvaises conditions de séchage - séchage trop lent
Application à la mauvaise saison : période à forte hygrométrie (fin d'été et automne)
Chauffage insuffisant ou inexistant en cas d'application hivernale
Ventilation insuffisante ou inexistante pour une application intérieure
<b>Traces de sel en pied de mur</b>
Apport excessif d'humidité : réalisation d'une chape ou d'un revêtement dur
<b>Usure prématurée des enduits</b>
Débord de toiture insuffisant, manque protection contre les rejaillissements, fuites, remontées capillaires
<b>Désordres spécifiques à différents supports de terre crue ou d'autre nature</b>
Fissures : support insuffisamment sec dont le tassement et le retrait ne sont pas terminés
Fissures et défaut de séchage de l'enduit : manque de séchage du support
Décollement : nettoyage et purge insuffisants des parties non adhérentes
Fissuration : manque de bandes de joint entre les panneaux
Gonflement et déformation du support : application d'une couche d'enduit trop épaisse
Fissure de retrait : absence de couche d'impression primaire adapté, trop grande capacité d'absorption du matériau
Décollement de l'enduit : séchage insuffisant, présence d'huile de décoffrage, absence d'un primaire d'accrochage adapté
Fissuration : séchage insuffisant
Décollement : manque de rugosité du support, absence de primaire d'accrochage adapté

•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
				•	
			•		
	•				
<b>ADOBE BRIQUE TC</b>	<b>BAUGE</b>	<b>PISÉ</b>	<b>TERRE-PAILE</b>	<b>TORCHIS</b>	<b>AUTRES SUPPORTS</b>
			•	•	•
					•
					•
					•
<b>ADOBE BRIQUE TC</b>	<b>BAUGE</b>	<b>PISÉ</b>	<b>TERRE-PAILE</b>	<b>TORCHIS</b>	<b>AUTRES SUPPORTS</b>
•	•	•	•	•	•
<b>ADOBE BRIQUE TC</b>	<b>BAUGE</b>	<b>PISÉ</b>	<b>TERRE-PAILE</b>	<b>TORCHIS</b>	<b>AUTRES SUPPORTS</b>
•	•	•	•	•	•
<b>ADOBE BRIQUE TC</b>	<b>BAUGE</b>	<b>PISÉ</b>	<b>TERRE-PAILE</b>	<b>TORCHIS</b>	<b>AUTRES SUPPORTS</b>
		•			
				•	
					<i>enduit ancien terre crue</i>
					<i>panneaux de terre crue</i>
					<i>panneaux terre crue extrudés</i>
					<i>blocs de béton cellulaire</i>
					<i>paroi béton</i>
					<i>enduit neuf terre crue</i>
					<i>enduit au plâtre ou à la chaux</i>

## ANNEXE 4 : TABLEAU SYNOPTIQUE DES DESORDRES DES ENDUITS

AUTRES ENDUITS : CHAUX HYDRAULIQUE, CIMENT	
<b>Gonflement et décollement de l'enduit</b>	
Evaporation contrariée des remontées capillaires : enduit ciment sur soubassement	
Condensation sur le parement en terre : enduit ciment sur les murs	
Infiltrations d'eau derrière l'enduit suite à détérioration ponctuelle de l'enduit, fuite en toiture, ... : dégradation invisible	
Rigidité des enduits ciment ou fortement hydrauliques sur support plus souple : fissures de tension, infiltration d'eau, gel et décollement de l'enduit (sonne creux)	
<b>Fissuration horizontale de l'enduit</b>	
L'humidité excessive en pied de mur à la jonction du soubassement : signe de la fonte de la terre notamment du pisé	
<b>Fissuration</b>	
Rigidité des enduits ciment ou fortement hydrauliques sur support plus souple	
<b>Effondrement de la construction</b>	
Enfermement des encastresments des têtes de solives et des bois de charpente (pourriture des abouts)	
<b>Inconfort intérieur</b>	
Perte de la capacité thermique - Sensation de froid humide	
<b>Autres désordres</b>	
Retardement du séchage du mur en terre-paille : les enduits freinent le séchage	
Fissuration et décollement de l'enduit sur mur terre-paille : tassement lors du séchage du mur	
Evaporation contrariée par le calfeutrement des joints et fissures avec des produits silicones ou des mastics organiques	

ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	AUTRES SUPPORTS
	•	•			
•	•	•			
	•				
	•			•	
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	AUTRES SUPPORTS
		•			
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	AUTRES SUPPORTS
				•	
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	AUTRES SUPPORTS
•	•	•	•	•	
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	AUTRES SUPPORTS
	•				
ADOBE BRIQUE TC	BAUGE	PISÉ	TERRE-PAILE	TORCHIS	AUTRES SUPPORTS
			•		
			•		
			•		

# BIBLIOGRAPHIE

Seuls sont recensés les ouvrages lus dans le cadre de cette étude

## OUVRAGES GÉNÉRAUX SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

- ANGER Romain, FONTAINE Laetitia - *Grain de bâtisseurs* - CRAterre Edition, 2005.
- CHAZELLES (de) Claire-Anne, ROUX Jean-Claude, CHAUSSERIE-LAPREE Jean - *Les constructions en terre crue des gaulois et des gallo-romains du midi méditerranéen* - Contribution à : Rencontres d'archéologie et d'histoire du 7 au 9 décembre 2012 au Pont du Gard sur les constructions en terre crue - Pré-actes, 2012.
- CRAterre, DOAT Patrice, HAYS Alain, HOUBEN Hugo, MATUK Silvia, VITOUX François - *Construire en terre* - Editions Alternatives, 1979.
- LEYLAVERGNE Elvire - *La filière terre crue en France. Enjeux, Freins et perspectives* - Mémoire de Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement Architecture de Terre - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, 2012.
- PIGNAL Bruno - *Terre crue, Techniques de construction et de restauration* - Eyrolles, 2005.
- RÖHLEN Ulrich, ZIEGERT Christof - *Construire en terre crue* - Le Moniteur, 2013.

## OUVRAGES SUR LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES

### ADOBE - BRIQUE DE TERRE CRUE

- AUBERT Jean-Emmanuel - *Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées*. Rapport final du projet TERCRUSO - INSA Toulouse, LMDC, avril 2013.
- TRAN Thanh - *Caractérisation des briques en terre crue* - rapport de stage LMDC, 2010.
- KUWUFINE Déodonne - *Les propriétés des matériaux de construction en terre crue* - rapport de stage LMDC, 2011.
- CAGNON Hugo - *Mesures des propriétés hygroscopiques des briques en terre crue pour la construction moderne et écologique en terre* - Rapport de stage M2P - LMDC, juin 2012.
- KLEIN Alain - *La construction en adobes, en Midi-Pyrénées (sud-ouest de la France). Fin XVIIIe - milieu XXe siècles* - 3ème Echanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. Table ronde de Toulouse - Editions de l'Espérou, Montpellier, 2011.

- P'KLA Abalo - *Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries "BTC-Mortier de terre"* - Thèse de doctorat Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- PHILIZOT D., BATALLA G. - *Construction terre bois international*. Projet en cours. Exposé de la démarche - Reims, 1982.
- PNR<sup>26</sup> Montagne de Reims - *Matériaux et couleurs du bâti sur la Montagne de Reims*. Comprendre, apprécier et valoriser - janvier 2016.

### BAUGE

- DELAGREE Mickaël - *Désordres constatés sur le bâti en terre, une structure agressée* - in TIEZ BRIEZ n° 35, 2016.
- PNR Marais du Cotentin et du Bessin - *Terre de bâtisseurs* - 2010.
- PNR Marais du Cotentin et du Bessin - *Restaurer son bâti en terre* - mai 2010.

### ENDUITS

Elément du projet TERCRUSO :

- DELINIERE Rémi - *Caractérisation des produits de construction en terre crue dans la région Midi-Pyrénées - Approche expérimentale et analyse d'un projet de norme sur les enduits en terre* - rapport de stage LRPC Toulouse - 2011.

### PISÉ

- ALEX Dorothée - *Petit guide des architectures en pisé à Lyon* - Mémoire de master Ecole nationale supérieure d'architecture de Lyon, 2011.
- BUI Quoc-Bao - *Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques* - Thèse de doctorat Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2008.
- CHABRIAC Pierre-Antoine - *Comportement hygrométrique du pisé* - Thèse de doctorat Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2014.
- CHABRIAC P.A., FABBRI A., GRILLET A.C., MOREL J.C., SOUDANI L., WOLOSZYN M. - *Étude de la pertinence des hypothèses dans la modélisation hygrothermique du pisé* - Conférence IBPSA Arras, 2014.
- CHAMPIR F., FABBRI A., HEITZ P., MEUNIER N., MOREL J.C., SOUDANI L., - *L'isolation du pisé. Pertinences et principes* - In Translettre LGCB-ENTPE, août 2015.

26. Parc Naturel Régional

- FREY Nadège - *Détermination des caractéristiques thermiques et hydriques du pisé, simulations numérique et expérimentale de son comportement face à la migration d'humidité*, Projet de fin d'études réalisé à Nunc Architecture - Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 2011.
- JEANNET Jacky, SCARATO Pascal - *Cahier d'expert bâti en pisé. Connaissance, analyse, traitement des pathologies du bâti en pisé en Rhône-Alpes et Auvergne* - février 2015.
- PNR Livradois-Forez - *Rénover et construire en pisé dans le PNR du Livradois-Forez* - juillet 2011.
- HEITZ Philippe - *La pathologie humide du pisé* - Qualité Construction n°143- mars/avril 2014.
- HEITZ Philippe - *Isolation et préfabrication : les nouveaux enjeux du pisé* - Qualité Construction n°144 - mai/juin 2014.

#### TERRE ALLEGEE

- VOLHARD Franz - *Construire en terre allégée* - Actes Sud, avril 2016.

#### TORCHIS

- CODEM - *Réhabiliter le bâti picard à pan de bois. Guide méthodologique pour une réhabilitation énergétique respectueuse du bâti picard à pan de bois* - avril 2014.
- DEWULF Michel - *Le torchis, mode d'emploi* - Eyrolles, 2ème édition 2015.
- PNR des Caps et Marais d'Opale - *Guide technique du bâti à pan de bois et torchis* - décembre 2009.

#### RAPPORTS

- AsTerre - Rapport final : *Construire en terre crue : étude sur les obstacles au développement de la construction en terre crue en France* - Janvier 2013.

#### ARTICLES

- EKOLOGIK n° 50 - mai, juin, juillet 2016.
- Patrice DOAT et Jean DETHIER - *Architecture en terre crue - quel avenir en France ?*
- Dominique GAUZIN-MULLER - *Renaissance de l'architecture en terre.*
- Dominique GAUZIN-MULLER - *Conservatoire des échantillons de sols à Orléans.*

- Dominique GAUZIN-MULLER - *Martin Rauch, le magicien du pisé.*

#### OUVRAGES RELATIFS AUX RÈGLES DE L'ART

- NF XP P13-901 - *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - spécifications - méthodes d'essai - conditions de réception* - Paris : AFNOR, 2001
- NF DTU 26-1 - *Travaux de bâtiment - Travaux d'enduits de mortiers - Règles Professionnelles - Enduits sur supports composés de terre crue* - Ecobâtir, Le Moniteur, 2013.

#### DOCUMENTS DIVERS

##### ADOBE - BRIQUE TERRE CRUE

- CAUE Midi-Pyrénées - *Fiche Techniques et Matériaux : Mur en briques de terre crue* - septembre 2012.
- LIBNAM - Fiche pédagogique : *Fabrication de briques de terre compressée* - mars 2014.
- LE VILLAGE - *Brique de terre crue compressée stabilisée - Fiche technique* - novembre 2013.

##### BAUGE

- CAUE Midi-Pyrénées - *Fiche Techniques et Matériaux : mur en bauge* - août 2012.
- LIBNAM - *Fiche pédagogique : la bauge* - mars 2014.
- LIBNAM - *Fiche pédagogique : fabrication et pose de la bauge fabriquée de manière mécanisée* - mai 2014.

##### ENDUITS

- CAUE Midi-Pyrénées - *Fiche Techniques et Matériaux : enduits extérieurs à la chaux ou à la terre* - août 2011.

##### PISÉ

- CAUE Midi-Pyrénées - *Fiche Techniques et Matériaux : Mur en pisé* - avril 2012.
- CEREMA, DDT de la Loire - *L'habitat en pisé* - 2016.
- Villes et Pays d'art et d'histoire Pays de lac de Paladru-Les trois Vals - *Le pisé en pays voironnais* - non daté

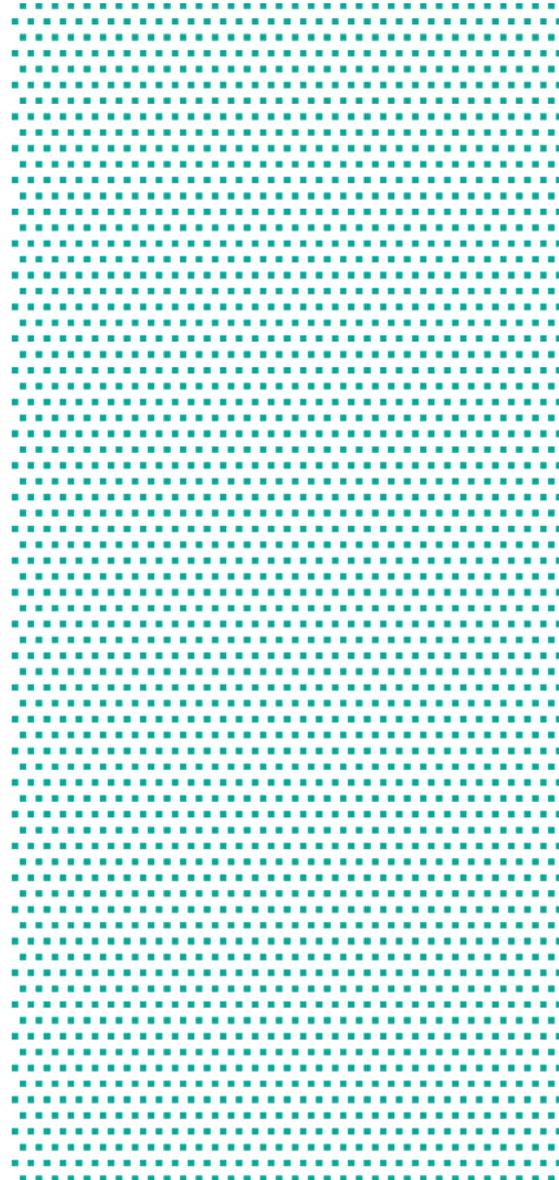
##### TORCHIS

- CAUE Midi-Pyrénées - *Fiche Techniques et Matériaux : ossature en pan de bois* - juillet 2012.

- LIBNAM - *Fiche pédagogique : fabrication et pose de torchis* - mai 2014.
- PNR des Vosges du Nord - *Restaurer et entretenir sa maison à pans de bois* - non daté.
- DRAC et DREAL Alsace - Fiche n°7 : *Habitat ancien en Alsace. Amélioration énergétique et préservation du patrimoine. Le logement dans un corps de ferme à colombage* - juillet 2015.

#### AUTRES DOCUMENTS

- TERRA Award, *1er prix mondial des architectures contemporaines en terre crue* - Dossier de presse, 2016.
- *Rénovation thermique du bâti traditionnel normand* - Étude réalisée en région Basse-Normandie - septembre 2013.
- *Pathologies, désordres et sinistres de la voûte nubienne* - Association la Voûte Nubienne - avril 2016.



# DANS LA MÊME COLLECTION

Retrouvez nos publications sur :

[www.qualiteconstruction.com/nos-ressources](http://www.qualiteconstruction.com/nos-ressources)



## INSTALLATIONS GÉOTHERMIQUES BASSE TEMPÉRATURE : POINTS DE VIGILANCE

Cofinancée par la DHUP et l'AQC, et réalisée par Socabat, cette étude synthétise les pathologies des installations de géothermie basse température et livre des éléments de maîtrise des risques observés.



## COMPLEXES D'ÉTANCHÉITÉ AVEC ISOLANT : POINTS DE VIGILANCE

Commanditée par l'AQC et réalisée par Eurisk, cette étude analyse les causes des sinistres impliquant les complexes d'étanchéité avec isolant (comportement des revêtements d'étanchéité, résistance à la grêle des revêtements en PVC, variation dimensionnelle des isolants, poinçonnement des fixations...) et met en exergue quelques points de vigilance.



## ISOLANTS BIOSOURCÉS : POINTS DE VIGILANCE

Cofinancée par la DHUP et l'AQC, cette étude met en exergue les principaux points de vigilance de quatre matériaux biosourcés (paille, chanvre, fibre de bois et ouate de cellulose) et livre les bonnes pratiques à adopter.



## DYSFONCTIONNEMENTS ÉLECTRIQUES DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES : POINTS DE VIGILANCE

Réalisée en partenariat par HESPUL et l'AQC, cette étude met en exergue les dysfonctionnements électriques des installations photovoltaïques et livre les bonnes pratiques à adopter dès la phase conception.

