



Panorama sur la construction en terre crue

Jean-Emmanuel AUBERT

Professeur des universités - Université Toulouse III - LMDC



*Laboratoire **Matériaux et Durabilité des Constructions***

- ✓ Quelques mots sur le LMDC
- ✓ Généralités sur la construction en terre crue
- ✓ Exemples d'études du patrimoine en terre crue
- ✓ Caractérisation de briques et d'enduits « industriels » (Tercruso)
- ✓ Association terre crue – matière biosourcée (Bioterra)
- ✓ Actualités de la recherche sur la terre crue

LMDC : Laboratoire Matériaux et Durabilités des Constructions à Toulouse

- **Personnels : environ 150 personnes**

- INSA (école d'ingénieurs): 18 EC
- Université Paul Sabatier : 32 EC
- ✓ UPSSITECH (école d'ingénieurs) } 11 EC
- ✓ Licence-Master } ⇒ 50 EC + 60 doctorants
- ✓ IUT de Toulouse (Bac+2-3): 18 EC
- ✓ UPS : IUT de Tarbes (Bac+2-3): 3 EC

- **3 pôles de recherche**

- Matériaux innovants - Pr JE Aubert - 26 EC
- Durabilité des matériaux et des ouvrages - Pr A Bertron
- Requalification, surveillance et maintenance du patrimoine bâti - Pr F Duprat

- **Pôle matériaux innovants pour le Génie Civil**

Matériaux innovants pour l'éco-construction

Matériaux naturels et biosourcés

Bétons de chanvre, adjuvants issus de l'agro-industrie, fibres et granulats végétaux, maçonneries en pierre ou en terre crue, ...

Granulats et éco-Liants alternatifs

Liants organiques, liants bélitiques, liants de verre, géopolymères, pouzzolanes naturelles et artificielles, matériaux activés, liants ternaires et quaternaires, sous-produits industriels et déchets, ...

Matériaux innovants pour les travaux publics

Valorisation de sous-produits industriels et déchets

Sous produits industriels et déchets, relargage des polluants en milieu aqueux, écotoxicologie...

Remblais, assises de chaussées et sols

Coulis d'injection, matériaux à bas-modules, sous-couches routières et traitement des sols, assises de chaussée, LHR, ...

Matériaux hydrocarbonés

Adjuvants issus de l'agro-industrie, pathologie et durabilité des liants noirs, ...

Nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

Nouveaux bétons

BHP, BTHP, BUHP, bétons à bas-pH, BAP, bétons à bas-modules - granulats de caoutchouc, ...

Nouveaux matériaux pour de nouvelles fonctionnalités

Lasures à béton, matériaux fibrés, composites, matériaux auto-cicatrisants, nanotubes de carbone, matériaux pour la dépollution, matériaux à changement de phase, ...

Mortiers techniques

Enduits, produits de scellement, mortiers en couches minces, matériaux projetés pour la rénovation ou pour l'esthétique, ...

Jean-Emmanuel AUBERT, 42 ans

CV

- Professeur des Universités à l'UPS depuis 2016
 - Directeur du département GCGEO de l'UPSSITECH
 - Responsable du pôle de recherche sur la matériaux innovants du LMDC
- Maître de Conférences à l'UPS de 2003 à 2016
- HDR en 2011 « Contribution à l'étude de matériaux de construction écologiques et durables »
- Thèse de doctorat en 2002 : «Valorisation dans les bétons d'une cendre d'IOM traitée par le procédé Revasol»
- 1993-1999 : formation universitaire (UPS) : deug, licence, maitrise et DEA Génie Civil

Enseignement (250 h/an)

- Cours/TP à l'UPS sur les matériaux de construction (ciments, bétons, matériaux naturels, matériaux métalliques, propriétés des matériaux...)
- Niveaux: 1A et 2AGCGEO et L3 Génie Civil (Bac+3 et Bac+4)

Recherche

- Thématique :
 - valorisation des déchets et matériaux routiers (assises de chaussées, stabilisation des sols)
 - éco-matériaux pour des constructions à faible impact, durables, confortables et saines.
- 1 centaine de publications et communications scientifiques dont 47 articles dans des revues internationales à comité de lecture (80% sur les éco-matériaux)
- Encadrements: 10 étudiants en thèse (4 en cours) et de 18 étudiants de Master 2

Généralités de la construction en terre crue

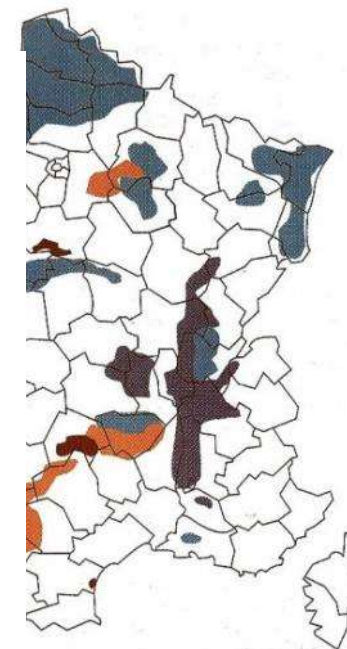
- La terre, un matériau de construction universel et multimillénaire

- ▶ Grande muraille de Chine (début au III^e siècle av. J-C)
- ▶ 30% des constructions dans le monde
- ▶ Ville de Shibam au Yémen (XVI^e siècle)

- ▶ Patrimoine f
- ▶ Adobe en



Source : Gandreau et Delboy, 2010



esquissée par Hubert Guillaud (directeur
née à Isigny-sur-mer le 13 octobre 2006.

Avantages

- Présente partout et totalement recyclable
- Très peu d'énergie grise incorporée
- Très bon régulateur d'humidité
- Bonne inertie thermique, incombustible
- Patrimoine régional à conserver...
- Seul matériau « accessible » dans de très nombreux pays...

Inconvénients

- Peu de connaissance scientifique
- Pas de règles professionnelles, ni de normalisation
- Sensible à l'eau
- Faiblement isolant



Source : Andreas Krewet AKTERRE



Source : Barthe SA www.terre-crue.fr



Grande Mosquée de Djenné au Mali



Constructions sur plusieurs niveaux au Yemen

Source : <http://autoconstruction-at.blogspot.com/2010/01/adobe-construire-en-brique-de-teere-et.html>



Maison traditionnelle en adobe, Sud-Ouest de la France
© Alain Klein



Torchis traditionnel
© Thierry Joffroy/CRAterre-ENSAG



Briqueterie Bouisset
(81) - 2010 - Briques
extrudées et enduits

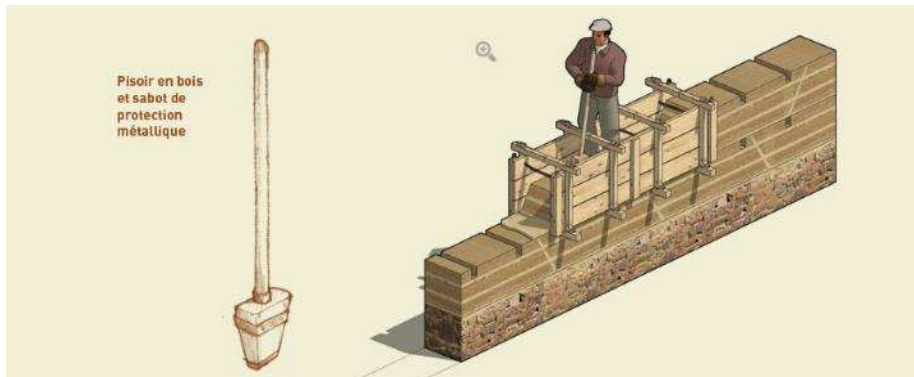


Pôle culturel de
Cornebarrieu (31) –
2017



Maison en pisé aux
Etats-Unis

Murs monolithiques



Pisé : terre compactée dans des coffrages



Bauge : terre plastique empilée (avec des fibres végétales ou pas)

Murs maçonnés



Adobes : blocs de terre moulée et séchées



Blocs de terre compressée



Briques extrudées

Remplissage



Torchis : mélange de terre et de paille qui remplit une structure porteuse en bois



Terre paille: technique voisine du torchis mais mélange plus riche en paille.

Enduits



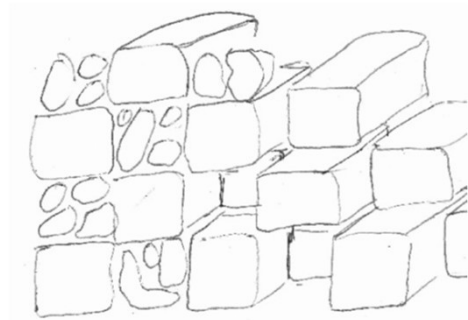
Intérieurs



Extérieurs sur construction en paille

Exemples d'études du patrimoine en terre crue

Etude d'un bâtiment en « damier » lors de sa rénovation:
Curiosités au niveau du dispositif constructif et des matériaux constitutifs



Spécificités:

Coups de sabre systématiques avec absence de joints verticaux, élancement important, absence de chaînage, pas de protection contre la pluie, **terre ultrafine avec absence de fissuration au séchage.**

⇒ Aubert JE, Marcom A, Oliva P, Ségui P. Chequered earth construction in south-western France. *Journal of cultural heritage* (2014)

TORCHIS



**Maison à St-Antonin
fin XIIIe**



**Maison à Montricoux
fin XVe**



**Ferme à Caussade
fin XVe**



**Ferme à Lapenche
fin XVIIIe**

ADOBE

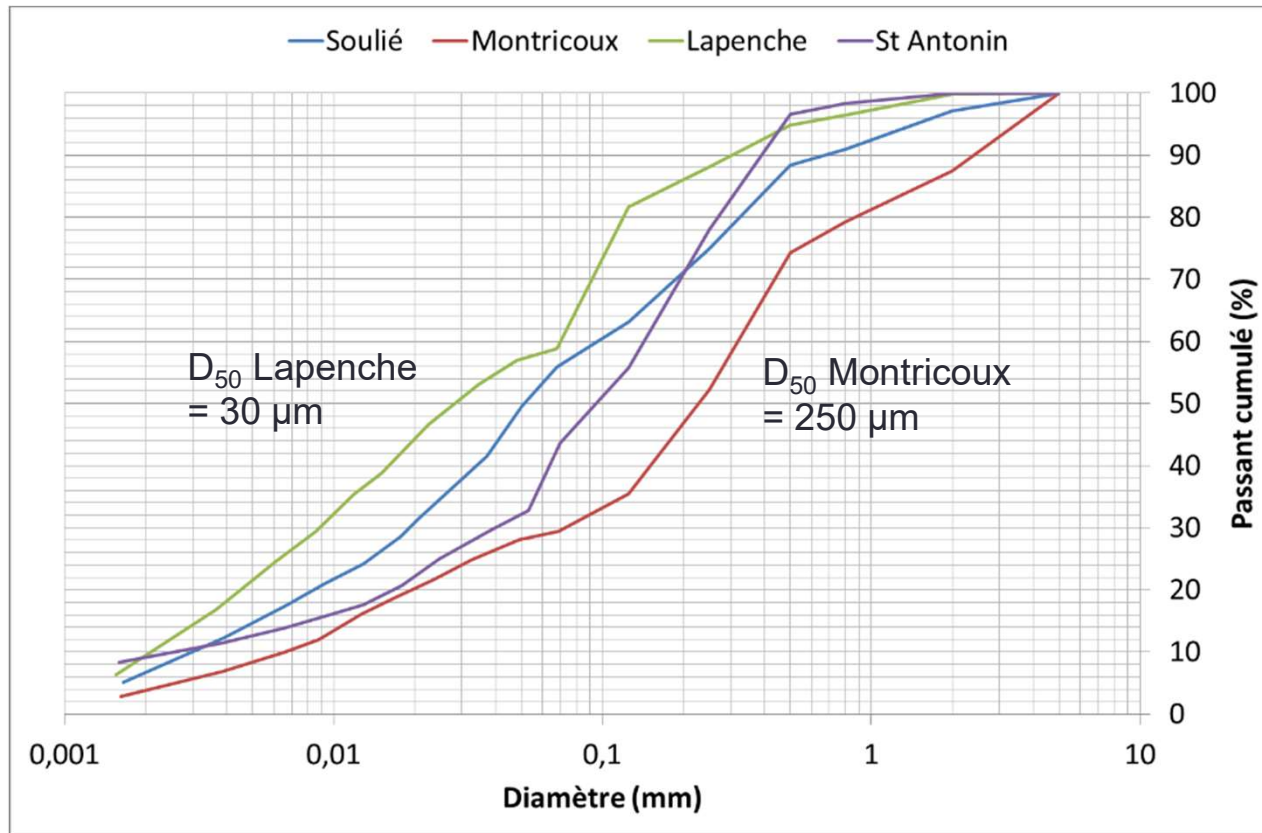


**Grange à Molières
fin XIXe**



**Demeure à Albias
fin XIXe**

➤ Granularité



⇒ Différences de tailles de grains très importantes!
Pourquoi?....



➤ Composition minéralogique qualitative par DRX

- ⇒ 3 échantillons contiennent les mêmes minéraux: quartz, illite/muscovite, feldspaths, chlorite
- ⇒ 1 échantillon différent (Soulié) : quartz, calcite, illite/muscovite, feldspaths, montmorillonite

➤ Proportion de paille

Soulié : 3,6%

Montricoux : 4,0%

Lapenche : 4,0%

} ⇒ Proches des valeurs de la littérature (3% en masse)

St Antonin : 7,4%

⇒ Teneur en paille très différente pour l'échantillon St Antonin! Pourquoi?

Etude toujours en cours... plus de questions que de réponses pour le moment!

Caractérisation de briques et d'enduits « industriels » (Tercruso)

Objectifs

- ✓ Enrichir les bases de données sur les caractéristiques des produits en terre crue (briques et enduits)
- ✓ Apporter des preuves scientifiques du bien-fondé de la construction en terre crue (environnemental et santé (FDES), confort, ...)
- ✓ Proposer des procédures d'essai pour la caractérisation des produits en terre crue

Partenaires

- ✓ 3 laboratoires de recherche : LMDC, LRA et LRPC
- ✓ Association des Compagnons du devoir (Midi-Pyrénées)
- ✓ Association Régionale d'Ecoconstruction du Sud-Ouest (ARESO)
- ✓ 6 briquetiers de Midi-Pyrénées : Barthe, Bouisset, Capelle, Nagen, Saverdun terres cuites, Terres cuites du Savès

Durée du projet et moyens

- ✓ Durée du projet : 3 ans (2009 à 2012)
- ✓ Soutien de la Région Midi-Pyrénées et de la DREAL
- ✓ 4 stages de 6 mois d'étudiants de Master 2 (financement propre LMDC)

Matériaux étudiés : briques et enduits

- ✓ 1 échantillon d'ancien adobe prélevé dans une bâtisse près de Caraman (31)
- ✓ 5 briques extrudées provenant de 5 briquetiers partenaires du projet



- ✓ 5 mélanges d'enduits prêts à l'emploi provenant de 5 briquetiers partenaires du projet



1- Caractéristiques des 6 « briques » : composition minéralogique, résistances mécaniques, tenue à l'eau et propriétés hygrothermiques.

⇒ Cagnon H, Aubert JE, Coutand M, Magniont C. *Hygrothermal properties of earth bricks. Energy and buildings (2014)*



2- Caractérisation des 5 « enduits » : consistance, retrait et résistances mécaniques

⇒ Deliniere R, Aubert JE, Rojat F, Gasc-Barbier M. *Physical, mineralogical and mechanical characterization of ready-mixed clay plaster. Building and environment (2014)*



Les résultats sont téléchargeables sur le site du CERCAD et sur le site d'ARESO

Association terre crue – matière biosourcée (Bioterra)

Objectifs

- ✓ Identifier les différentes souches microbiennes présentes dans des ouvrages réels en terre crue.
- ✓ Etudier les conditions de prolifération de ces souches en laboratoire sur des produits biosourcés en terre crue en fonction de différents paramètres.
- **Afin d'apporter la preuve scientifique de l'absence de prolifération microbienne dans les habitats en terre crue dans des conditions normales d'utilisation**
- ✓ Etudier l'intérêt d'ajouter des matériaux biosourcés aux briques et enduits en terre crue

Partenaires

- ✓ 5 laboratoires de recherche : LMDC, CEREMA, LGCB, LGC et LRSV
- ✓ 1 centre technique : Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction
- ✓ 3 industriels : agencement-structure, agronutrition et les carrières du boulonnais

Durée du projet et moyens

- ✓ Durée du projet : 4 ans (2014 à 2018)
- ✓ Soutien de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) - Villes et Bâtiments Durables 2013
- ✓ 9 Stages de 6 mois de Masters 2, 2 Thèses et 2 Post-doc

Terre : Fines Argilo-Calcaires (FAC)

- Résidus de lavage de granulats calcaires
- Boues séchées puis désagglomérées
- Entre 15 et 20% d'argiles



Paille



Chènevotte



Rafle de maïs

2 dosages en masse : 3 et 6%

Mais aussi : balles de riz, paille de lavande et résidus de liège

Mélange

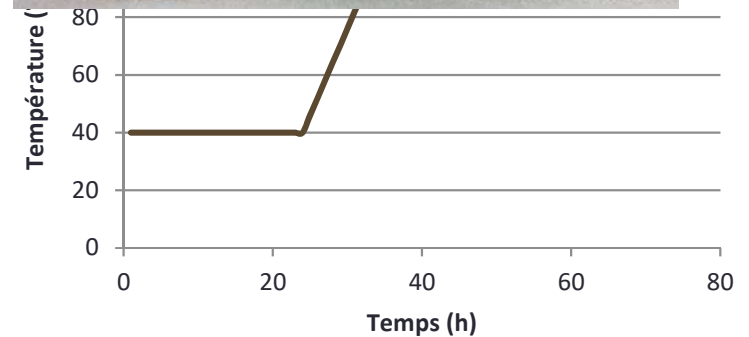
- Matériaux secs (terre + 6% granulats)
- Malaxage avec l'eau

Confection

- Moule cylindrique
- Compression

Séchage

- Entre 40 et 100°C
- Similaire à celui d'une briqueterie



➤ **Caractéristiques des matériaux biosourcés ajoutés**

→ Laborel-Preneron A, Magniont C, Aubert JE. Characterization of plant aggregates as resources for bioaggregates based building materials. *Waste Biomass Valorization* 9 (2018) 1095–1112

➤ **Propriétés mécaniques des briques de terre crue avec matériaux biosourcés**

→ Laborel-Preneron A, Aubert JE, Magniont C, Maillard P, Poirier C. Effect of plant aggregates on the mechanical properties of earth bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29(12) (2017)

➤ **Propriétés hygrothermiques des briques de terre crue avec matériaux biosourcés**

→ Laborel-Preneron A, Magniont C, Aubert JE. Hygrothermal properties of unfired earth bricks: effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy and buildings* 178 (2018) 265-278

➤ **Durabilité des briques de terre crue avec matériaux biosourcés**

→ Laborel-Preneron A, Faria P, Aubert JE, Magniont C. Assessment of earth-bioaggregate bricks durability. *Soumis dans la revue Journal of Building Engineering*

➤ **Tenue au feu des briques de terre crue avec matériaux biosourcés**

→ Laborel-Préneron A, Aubert JE, Magniont C, Lacasta A, Haurie L. Fire behavior of bio-based earth products for sustainable buildings. *ICBBM Ecografi 2017, International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France, June 21-23, 2017*

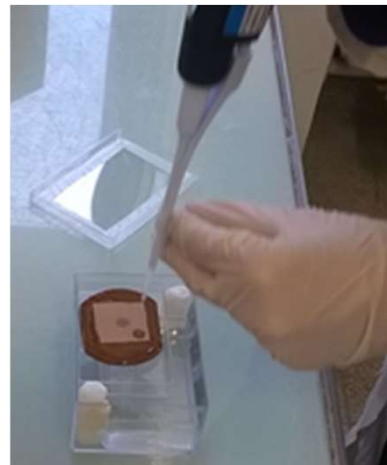
➤ **Prolifération microbienne à la surface de brique de terre crue avec matériaux biosourcés**

→ Laborel-Preneron A, Ouedraogo K, Simons A, Labat M, Bertron A, Magniont C, Roques C, Roux C, Aubert JE. Laboratory test to assess sensitivity of bio-based earth materials to fungal growth. *Building and environment* <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.003>

- L'ajout de faibles quantités de matières biosourcées (3 et 6%) réduit les performances mécaniques tout en améliorant trop faiblement l'isolation thermique
⇒ Intermédiaire entre terre crue seule et allégée (terre-paille ~ 15% massique) pas pertinent.
- Par contre, les propriétés hygrothermiques mesurées sur briques et sur enduits ont confirmé l'intérêt de la terre pour améliorer le confort intérieur.
- Les essais microbiologiques ont prouvé que le matériau terre crue avec ou sans matières biosourcées est sain.



Prélèvements in-situ



Essai de prolifération



Fabrication de plaque d'enduits

Actualités de la recherche sur la terre crue

- Projets de recherche sur la terre crue en cours (LMDC et ailleurs...):
 - Stabilisation des briques de terre crue notamment par des bio-polymères
 - Etude à l'échelle de la maçonnerie

- A l'international : « TC Rilem - Testing and characterisation of earth-based building materials and elements (2016-2020) » - 7 WG : Standard, Mechanical behavior, Characterisation, Seismic, Durability, Hygrothermal and acoustic, Energy – SoA : ok, démarrage des essais croisés.

- Au niveau national : PN Terre - Démarrage prévu en 2019 - CAPEB, Ecobâtir, FFB, FNSCOB BTP, MPF, Areso, Arpe, Atouterre, Asterre, Collectif Terreux Armoricaïn, Tera, Cerema, Craterre, ENTPE, IFSTTAR, LMDC.

- Normalisation : travaux à la DHUP sur les guides de bonnes pratiques : bauge, pisé, briques, enduits, torchis et terre allégée - en cours de finalisation.

- Normalisation : révision en cours de la norme XP13-901 « Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons » depuis 2017 → rédaction d'une nouvelle norme sur les briques de terre crue

- Encore beaucoup de travail amont (recherche: formulation, durabilité,...) et aval (normalisation, industrialisation, développement de nouvelles filières)
- Beaucoup d'actions en cours mais manque de moyens financiers provenant du domaine privé

Conclusions plus personnelles

- Fonctionnalité des matériaux = « **le bon matériau à la bonne place** »! + remettre de l'intelligence constructive dans la conception des bâtiments!
- **Principe de proximité et de recyclabilité essentiels!**
- Importance du patrimoine vernaculaire = « **Essayons de faire au moins aussi bien, pour aussi longtemps et avec aussi peu d'impact que ce que faisaient nos anciens** »
- Il faut absolument **revaloriser les métiers manuels**... et adapter nos modes de vie et de consommation aux exigences environnementales pour le bien de la planète et des générations futures.....

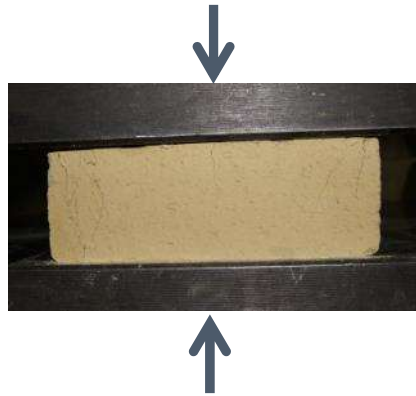
Merci de votre attention !



*Dépendance en terre crue rénovée en cabinet de
Kinésithérapeutes, Castelnau-Magnoac (65)*

Comment mesurer la résistance en compression des briques de terre crue?

Risque d'erreur élevé!



Essai direct sur des briques : 40.7x13.6x 4.8 cm



Pas de rupture à 300 tonnes (charge maxi de la presse) $\Leftrightarrow R_c > 45 \text{ MPa}$!

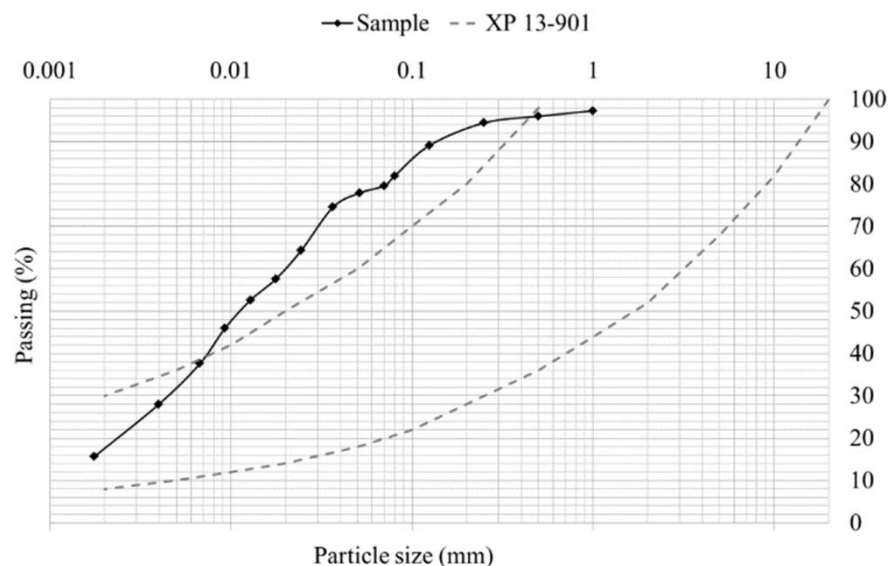
\Rightarrow Aubert JE, Fabbri A, Morel JC, Maillard P. A soil block with a compressive strength higher than 45 MPa! Construction and Building Materials 47 (2013) 366-369

Problèmes de procédures...

Résistance en compression sèche mesurée sur une BTC stabilisée (30x14x10 cm):

Norme XP P 13-901 :	2,1 MPa
Norme allemande DIN 18945 (Août 2013) :	4,1 MPa
Essai direct à la verticale :	3,0 MPa

Etude d'un bâtiment en « damier » lors de sa rénovation : Curiosités au niveau des adobes (« Mottes »)



- La terre constitutive des adobes est extrêmement fine et il n'y a pas de sable, uniquement quelques fibres végétales
- La composition minéralogique de la terre est particulière (présence de vermiculite)

⇒ Terre du Magnoac tout à fait particulière : sur qqs km², on retrouve toutes les techniques de construction en terre crue



Ruine en pisé: absence d'élément grossier dans la terre