



Durabilité des matériaux géo-bio-sourcés

Focus sur les matériaux en terre crue avec et sans particules végétales

Aurélie Laborel-Préneron alaborel@insa-toulouse.fr
Antonin Fabbri antonin.fabbri@entpe.fr

Construire en terre ?



Qu'est-ce que la terre crue ?

Collecte de la terre

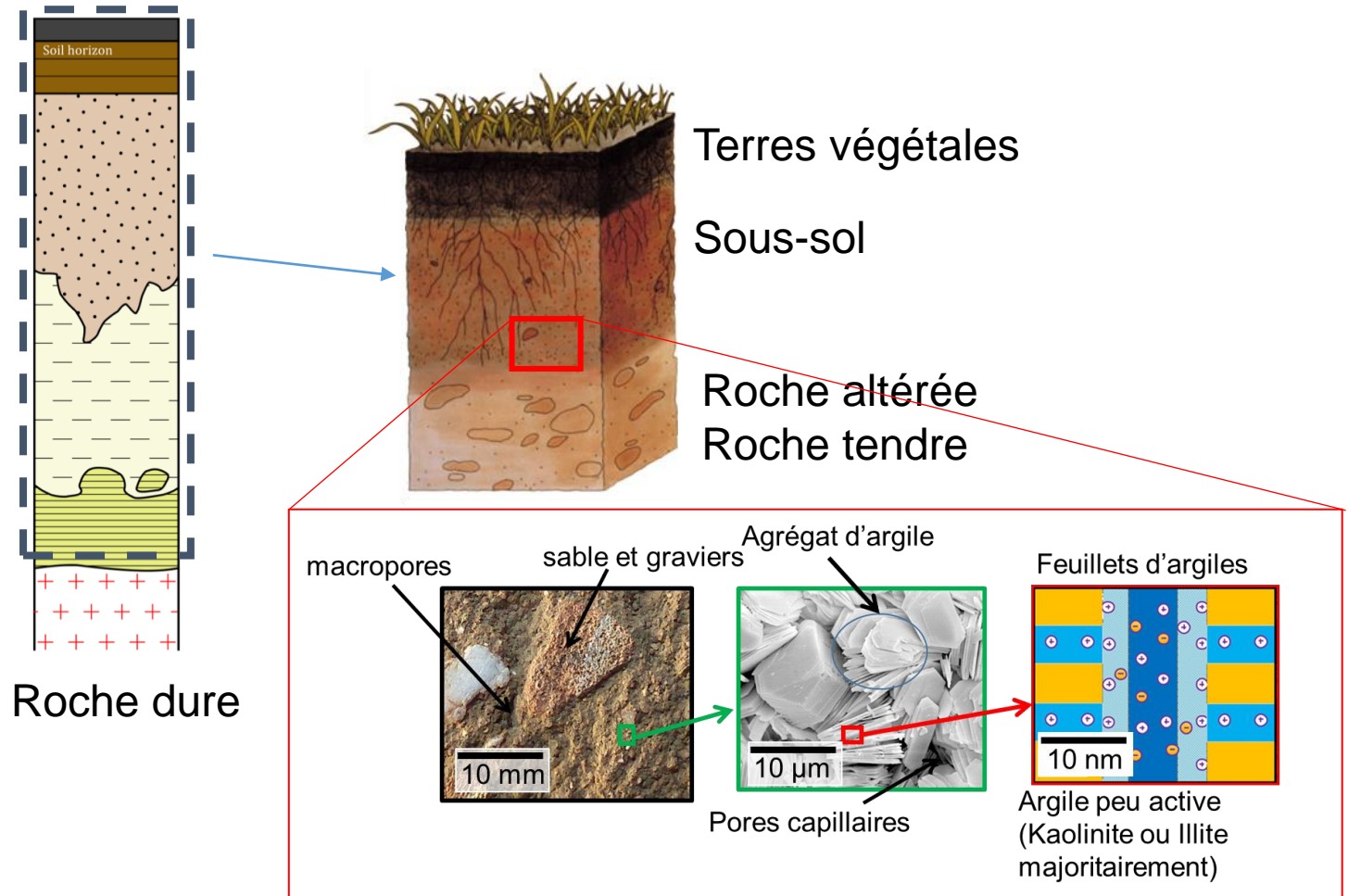


© Pierre-Antoine Chabria

« Déchet » provenant d'opérations géotechniques



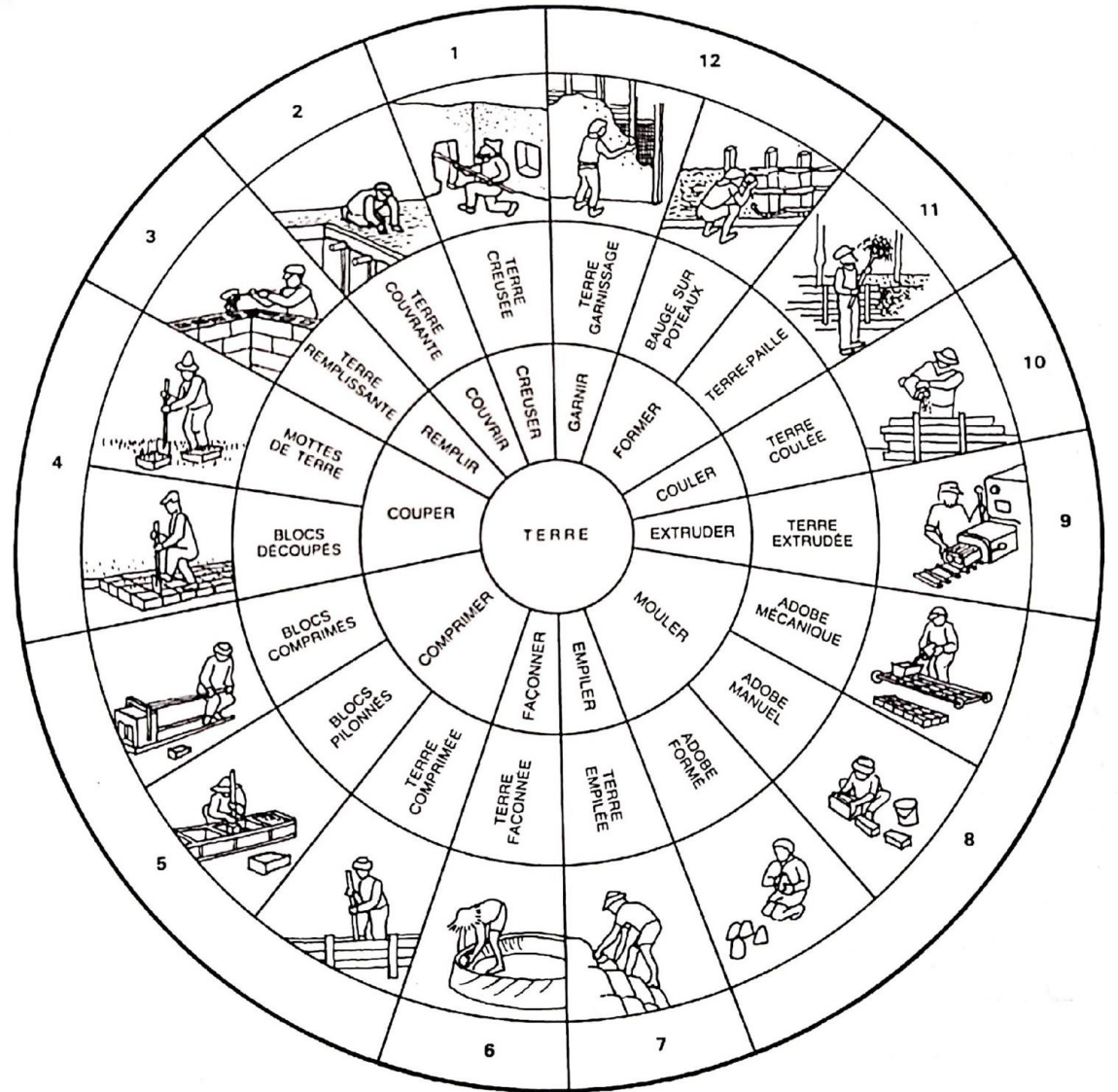
“Matériau naturel issu du sol ou du sous-sol, utilisé cru, et dont la cohésion est assurée par la présence d'argiles.”



Adapté de Hamard, 2017, Thèse ENTPE

Comment construire en terre ?

- **Pisé**
- **Adobe**
- **Torchis**
- **Bauge**
- **Briques de terre comprimées**
- **Enduit en terre**
- **Terre coulée**
- **Briques de terre extrudées**
- **Terre allégée**
- **Terre comprimée**

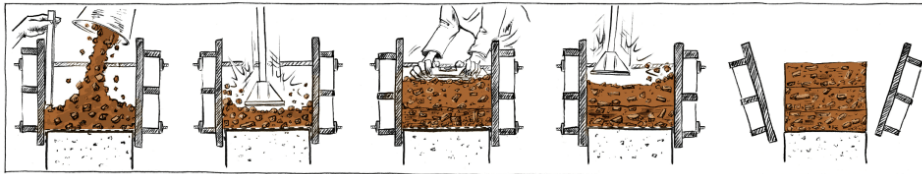


PISÉ

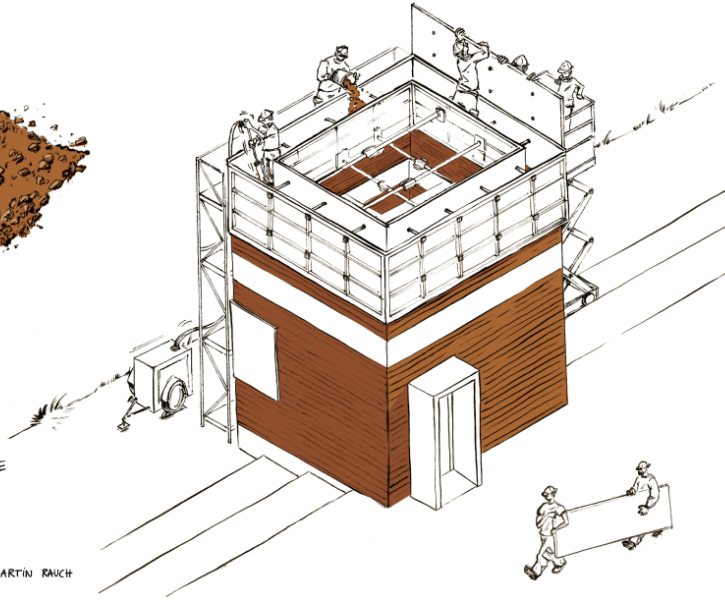
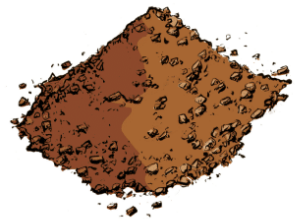


TECHNIQUE

Le pisé permet de construire des murs massifs, qui peuvent être porteurs, en damant entre des bandes de fines couches de terre pulvérulente. Le mélange étant à peine humide, le décoffrage est immédiat. Les strates compactées restent visibles, avec une texture riche par son grain et sa couleur. À cause de l'intensité du travail, le pisé est un matériau haut de gamme dans les pays industrialisés, et des entrepreneurs comme Martin Rauch expérimentent la préfabrication pour baisser les coûts. Dans certains pays la réglementation exige une stabilisation avec environ 10 % de ciment.



UN MÉLANGE DE TERRE HUMIDE (5 À 12 % D'EAU) CONTENANT GRAVIERS, SABLES, SILTS ET ARGILES, EST VERSÉ PUIS RÉPARTI DANS LE COFFRAGE POUR FORMER UNE COUCHE D'ENVIRON 20 CM.
 LA TERRE EST COMPACTÉE À L'AIDE D'UN PISOIR MANUEL EN BOIS OU EN ACIER, OU D'UN FOULOIR PNEUMATIQUE.
 LA COUCHE SUIVANTE EST VERSÉE PUIS RÉPARTIE.
 CHAQUE NOUVELLE COUCHE EST À SON TOUR COMPACTÉE.
 LE MUR, GÉNÉRALEMENT ÉPAIS DE 40 À 60 CM, PEUT ÊTRE DÉCOFFRÉ IMMÉDIATEMENT.



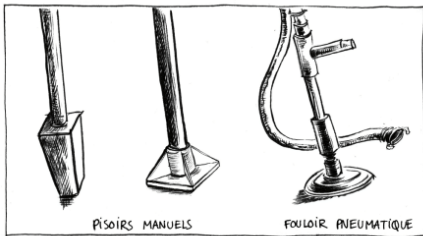
TECHNIQUE TRADITIONNELLE

SÄHLHÖLZLI

ZÜRICH, SUISSE - 2002

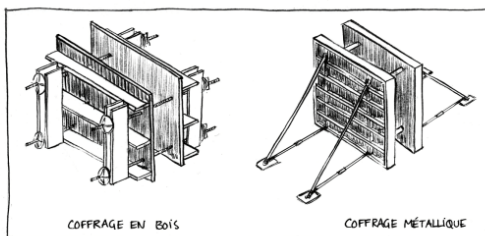
Architecte : ROGER BOLTSCHAUER

Entreprise : LEHM TON ERDE - MARTIN RAUCH



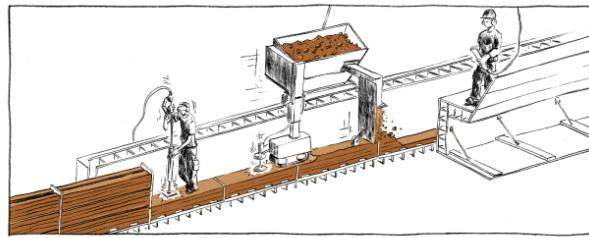
PISOIRS MANUELS

FOULOIR PNEUMATIQUE



COFFRAGE EN BOIS

COFFRAGE MÉTALLIQUE



LES ÉLÉMENTS DE FAÇADE SONT PRÉFABRIQUÉS EN SÉRIE DANS UN COFFRAGE DE 50 M DE LONGUEUR.

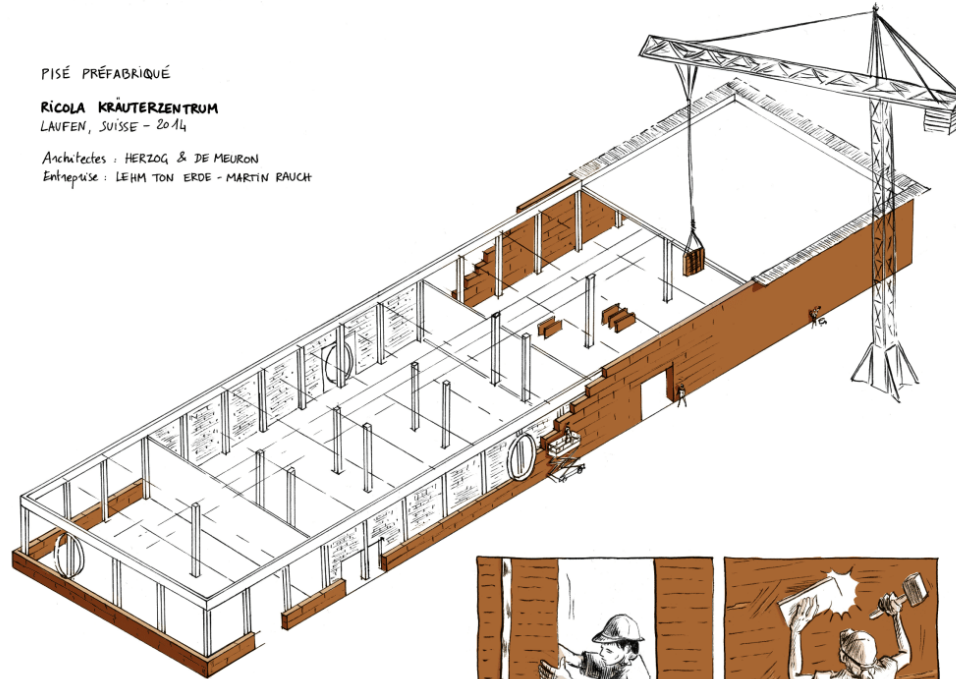


ILS SONT ENSUITE ENTREPOSÉS POUR SÉCHAGE, AVANT LE TRANSPORT ET LA POSE SUR LE CHANTIER.

PISÉ PRÉFABRIQUÉ

RICOLA KRÄUTERZENTRUM
LAUFEN, SUISSE - 2014

Architectes : HERZOG & DE MEURON
Entreprise : LEHM TON ERDE - MARTIN RAUCH



LES MODULES PRÉFABRIQUÉS SONT MIS EN PLACE AVEC UN MORTIER DE TERRE.



LES JOINTS SONT RETOUCHÉS À LA MAIN AVEC LE MÉLANGE ORIGINAL.

HISTORIQUE

À cause de la technicité liée à l'usage du coffrage, le pisé est plus récent que l'adobe ou le torchis. De très anciens vestiges (9^e siècle avant J.-C.) ont été repérés en Tunisie, et de nombreux sites inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO en témoignent : tronçons de la Grande Muraille de Chine, palais du Potala au Tibet et de l'Alhambra à Grenade, ksar Ait-Ben-Haddou au Maroc. En France, le pisé est traditionnel en Auvergne et surtout en Rhône-Alpes : 40 % de l'architecture vernaculaire et plusieurs immeubles du Vieux Lyon. Sa renaissance doit beaucoup aux livres de l'architecte-entrepreneur François Coignet (1740-1830).

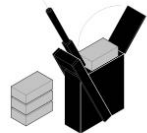


copyright: TERRA Award - Pauline Sémond (illustrations), Dominique Gauzin-Müller (textes)

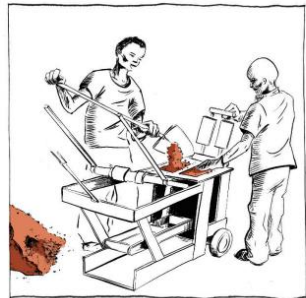


TECHNIQUE

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont fabriqués dans des presses manuelles ou mécanisées avec de la terre humide et pulvérulente, composée d'une proportion équilibrée d'argiles, limons, sables et petits graviers. L'addition de ciment ou de chaux est courante pour augmenter les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'eau. Il existe des unités industrielles capables de fabriquer 50 000 blocs par jour, mais la logistique de production et de transport des matériaux rend ces BTC moins économiques (et moins écologiques !) que celles des presses manuelles légères, facilement déplaçables d'un chantier à l'autre.



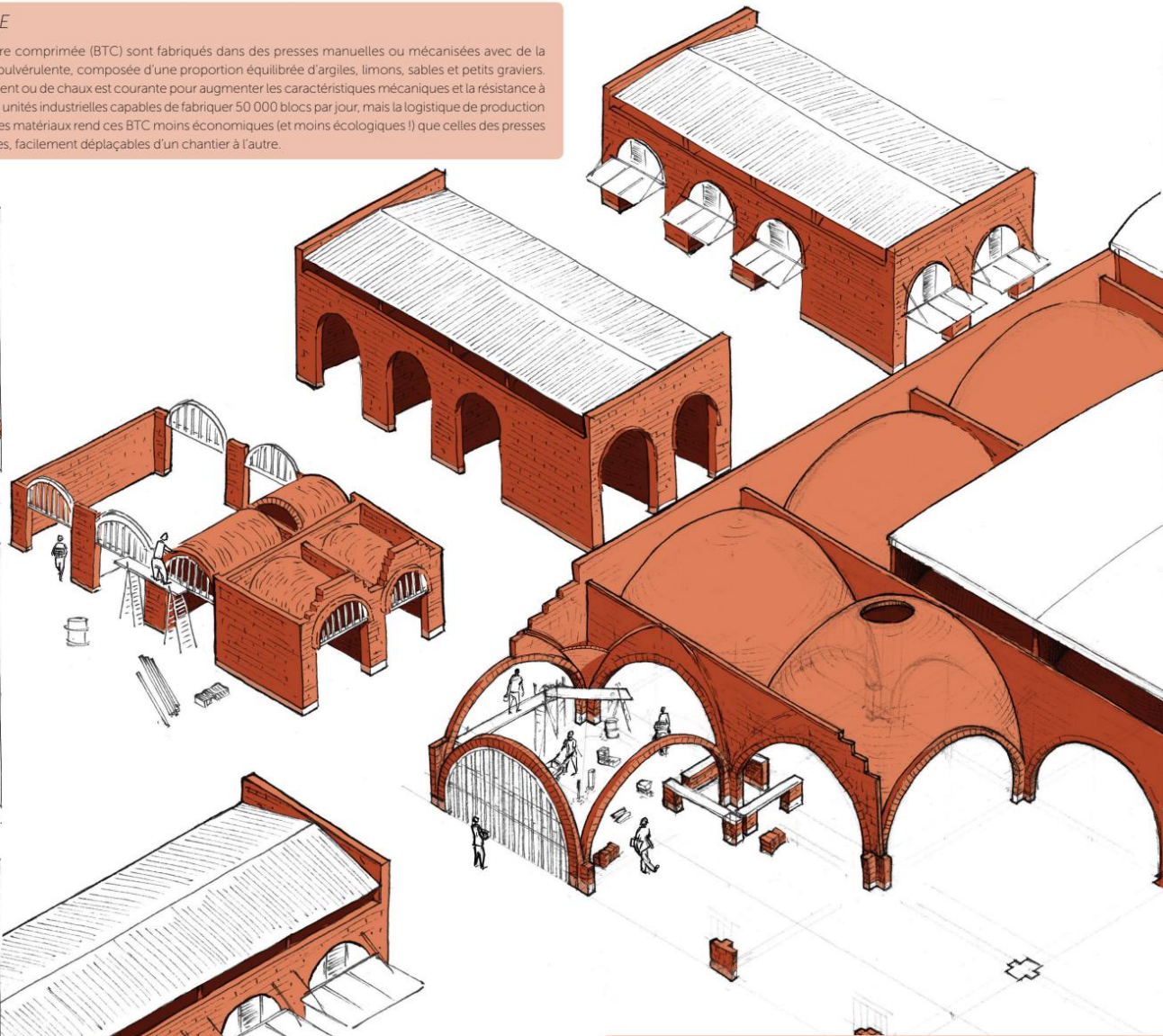
LORS DE SA PRÉPARATION, LA TERRE EST BRONÉE ET TAMISÉE POUR OBTENIR UN MATÉRIAU PULVÉRULENT, HUMIDE ET HOMOGÈNE.



LE MÉLANGE EST PLACÉ DANS LE MOULE DE LA PRESSE.

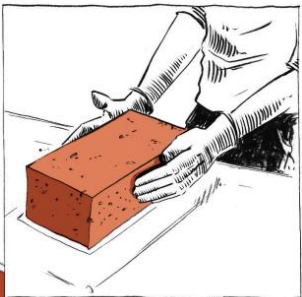


LA TERRE EST COMPRIMÉE MANUELLEMENT.



MARCHÉ CENTRAL

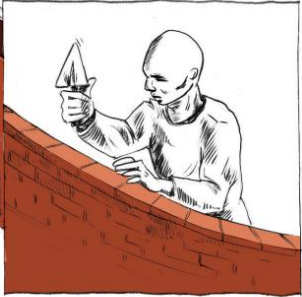
KOUDOUGOU, BURKINA FASO - 2005
Architectes : LAURENT SÉCHAUD ET PIERRE DEQUIER



LE BLOC EST DÉMOULÉ ET SORTI DE LA PRESSE AVEC BEAUCOUP DE PRÉCAUTIONS, CAR LES ARÊTES SONT FRAGILES.



QUAND ILS SONT STABILISÉS, LES BLOCS SONT EMPILÉS DANS UNE ZONE DE STOCKAGE POUR EFFECTUER UNE CURE HUMIDE SOUS BÂCHE D'ENVIRON 28 JOURS.

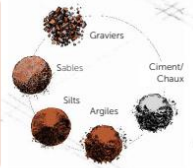


LES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE SONT MAÇONNÉS AVEC UN MORTIER DE TERRE.

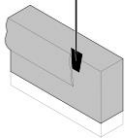
copyright: TERRA Award - Pauline Sémond (illustrations), Dominique Gauzin-Müller (textes)

HISTORIQUE

Les blocs de terre comprimée (BTC) ne sont apparus que très récemment. Vers 1950, la première presse manuelle de l'ingénieur colombien Raul Ramirez (Centre CINVA de Bogota), et ses 300 à 800 briques quotidiennes, a conquis le marché international par sa simplicité et sa légèreté. Après plusieurs perfectionnements, la technique a pris son essor dans le cadre de programmes d'habitat économique en Afrique et en Amérique latine. À Mayotte, 20 000 logements ont ainsi été réalisés avec le soutien de CRAterre. Les BTC se prêtent aussi à des édifices d'envergure, comme l'a prouvé l'architecte indien Satprem Maini avec une voûte de plus de 10 m de portée.



BAUGE



TECHNIQUE

Un mur en bauge est épais de 40 à 60 cm, voire plus, et monolithique comme le pisé. Il est généralement constitué d'un empilement de boules de terre, souvent additionnée de fibres végétales et parfois d'éléments minéraux (éclats de silex ou de terre cuite broyée). Après la constitution d'une couche de 50 à 60cm de hauteur, les faces sont battues pour éviter les fissures au séchage, puis taillées afin d'obtenir une surface plane. La version rurale française consiste à entasser à la fourche des paquets de terre, mais dans la plupart des régions du globe, les murs sont façonnés à la main comme une sculpture géante.



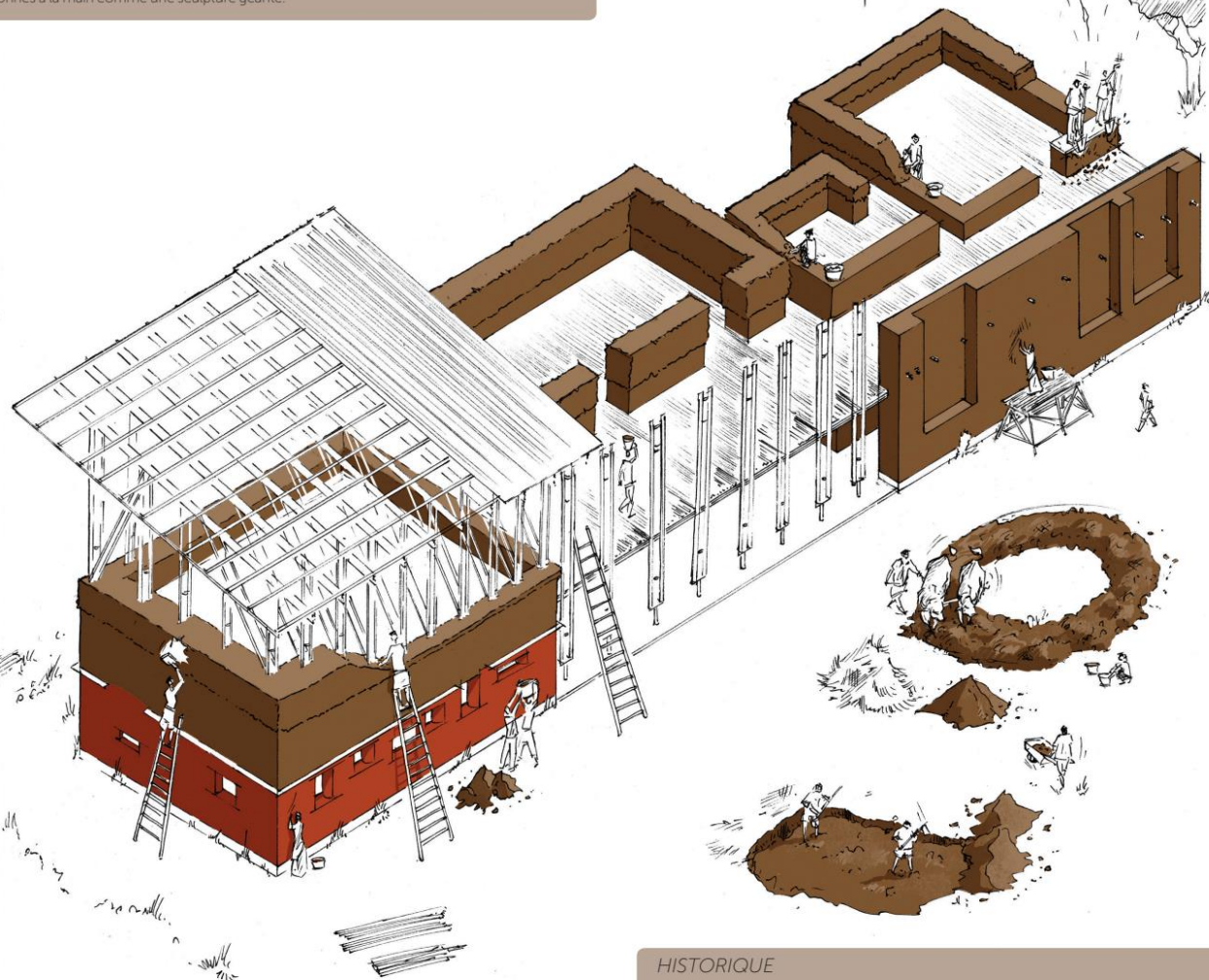
LA TERRE, SOUVENT EXTRAITE DU SITE, EST MALAXÉE À L'ÉTAT PASTIQUE (15 à 30 % D'EAU). ICI, ELLE A ÉTÉ ADDITIONNÉE DE PAILLE DE RIZ ET MALAXÉE PAR DES BUFFLES.



LE MÉLANGE EST ENVOYÉ DIRECTEMENT SANS FORME DE BOULES MODELÉES À LA MAIN, OU APPORTÉE DANS DES SEAUX OU DES PANIERS JUSQU'AU MUR À CONSTRUIRE.



LES BOULES SONT EMPILÉES SUR LE SOUS-BASSEMENT PAR COUCHES D'ENVIRON 50 à 60 CM DE HAUTEUR. ELLES SONT SOUVENT JETÉES LES UNES SUR LES AUTRES POUR UNE MEILLEURE COHÉSION.



CENTRE DE FORMATION POUR ÉLECTRICIENS

RUDRAPUR, BANGLADESH - 2008
Architecte : ANNA HERINGER

HISTORIQUE

La bauge est apparue au Proche-Orient vers la fin du 10^e millénaire avant J.-C., en même temps que le torchis sur branchages et les briques de terre crue façonnées à la main. Les habitats des premiers sédentaires ont été modelés avec de la terre argileuse amendée par des fibres végétales. La péninsule arabe possède de magnifiques exemples de construction en bauge, mais elle est aussi présente dans l'architecture vernaculaire africaine (Burkina Faso, Bénin, Ghana, Nigeria...) et dans le patrimoine rural du Devon anglais et des Abruzzes italiennes. Sans oublier les bourrines vendéennes et les longères bretonnes et normandes !



CHAQUE COUCHE EST BATTUE POUR REFFERMER LES FISSURES ÉVENTUELLEMENT APPARUES LORS DU SÉCHAGE, QUI DURE ENVIRON DEUX SEMAINES.



LES DEUX FACES DU MUR SONT TAILLÉES À L'AIDE D'UNE BÈCHE OU D'UN OUTIL TRANÇANT.

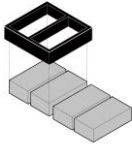


LE MUR EST DÉBARRASSÉ DES BOIS DE PAILLES QUI DÉPASSENT AFIN DE PRÉPARER UNE PAROI PLANE. SI LA SURFACE DOIT ÊTRE ENDUITE, ELLE EST PRÉPARÉE PAR SCARIFICATION OU GRATAGE POUR PERMETTRE UN BON ACCROCHAGE.



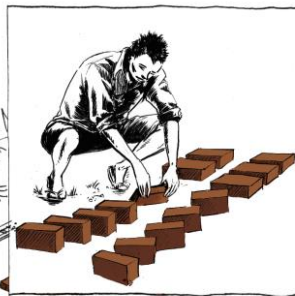
copyright: TERRA Award - Pauline Sémond (illustrations), Dominique Gauzin-Müller (textes)

ADOBE

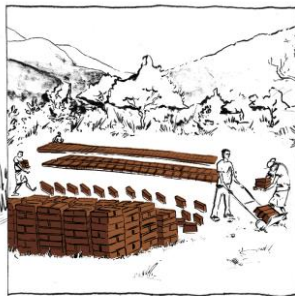


TECHNIQUE

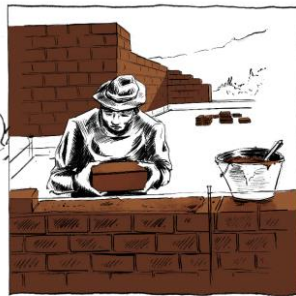
L'adobe est une brique de terre crue façonnée à la main ou moulée, puis séchée pendant quelques jours à l'air libre ou sur des aires couvertes. Argiles, limons et sables sont mélangés à de l'eau pour atteindre l'état plastique, et parfois à des fibres pour réduire les fissures lors du séchage. Pour des chantiers de taille modeste, fabriquer les briques dans de petites unités de production est rapide et économique, avec des conditions variables selon les pays (industrialisés ou en développement). L'édification de voûtes et coupoles dans la continuité des murs en adobe permet de couvrir les bâtiments sans recourir à des matériaux rares et chers.



APRÈS QUELQUES JOURS, LES BRIQUES SONT MANIPLABLES SANS DÉFORMATION. ELLES SONT POSITIONNÉES SUR LA TRANCHE POUR UN SÉCHAGE HOMOGENÈME.



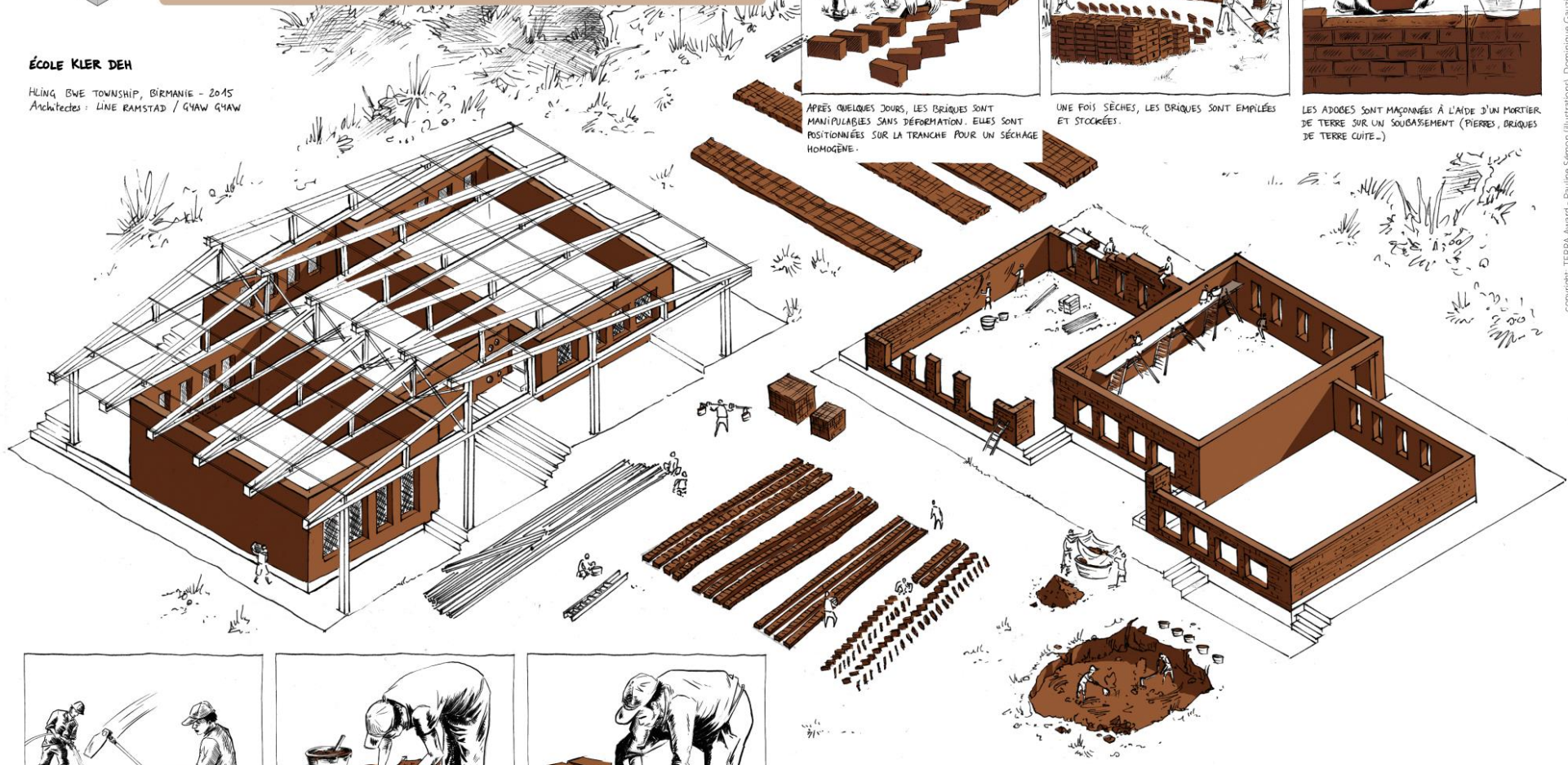
UNE FOIS SÈCHES, LES BRIQUES SONT EMPILÉES ET STOCKÉES.



LES ADOBES SONT MAÇONNÉES À L'AIDE D'UN MORTIER DE TERRE SUR UN SOUS-ASEMENT (PIERRES, BRIQUES DE TERRE CUITE...)

ÉCOLE KLER DEH

HUNG BWE TOWNSHIP, BIRMANIE - 2015
Architectes : LINE RAMSTAD / GWAW GWAW



LA TERRE EST MALAXÉE JUSQU'À ATTEINDRE L'ÉTAT PLASTIQUE (15 À 30% D'EAU).



UN MOULE EN BOIS AVEC UNE OU PLUSIEURS ALVÈRES EST REMPLI AVEC LE MÉLANGE.



LES BRIQUES SONT DÉMOULÉES ET LAISSÉES À SÉCHER SUR DE VASTES SURFACES.

HISTORIQUE

L'origine de l'adobe coïncide avec la révolution néolithique et la sédentarisation de l'homme au Proche-Orient. Des briques de terre en forme de pain, façonnées à la main vers 8 000 avant J.-C., ont été trouvées à Jéricho et Mureybet. Les plus anciennes produites dans des moules, environ mille ans plus tard, ont été repérées à Çatal Höyük, en Turquie. Une vingtaine de centres historiques en adobe sont classés au patrimoine mondial, dont Shibam au Yémen, Tombouctou au Mali, Alep en Syrie, Lima et Mexico en Amérique latine. En France, la brique de terre crue est surtout présente en Midi-Pyrénées (Haute-Garonne, Gers, Tarn).



copyright: TERRA Award - Pauline Sémond (illustrations), Dominique Gauzin-Müller (textes)

R MBS
MAÎTRES d'ŒUVRE de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

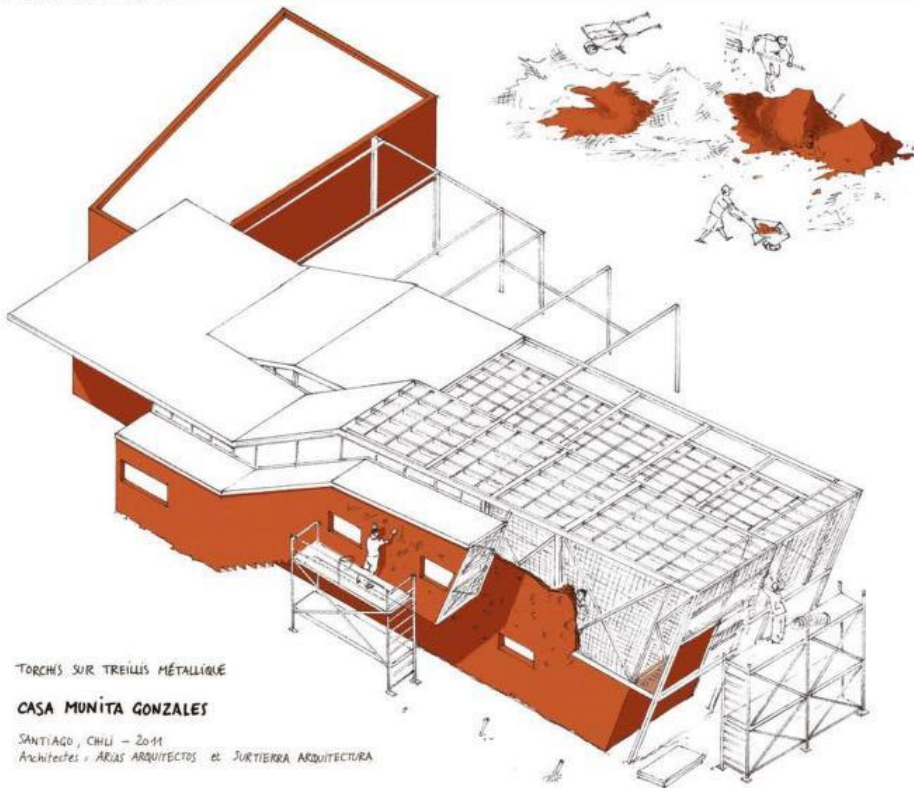


TORCHIS

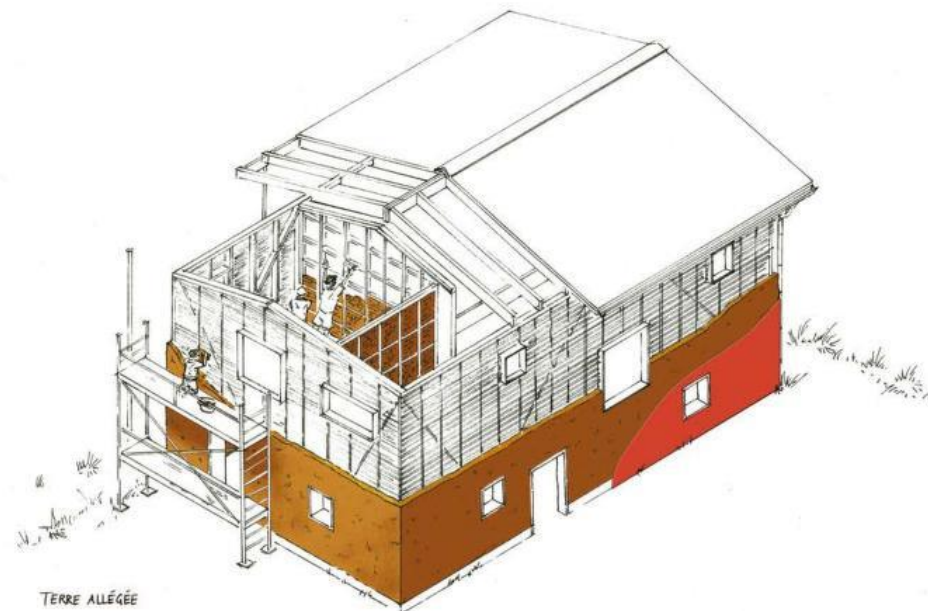
TECHNIQUE

Les terres à torchis sont généralement fines, limoneuses-argileuses et collantes. Le manque de sable pouvant entraîner des fissurations, on y ajoute souvent des fibres végétales. Le mélange, mis en œuvre à l'état plastique, est étalé sur un lattis (bois, osier, bambou) ou un clayonnage, fixé dans une ossature porteuse en bois appelée colombage. Le chilien Marcelo Cortes fut l'un des premiers à décliner cette technique sur une structure métallique. L'allemand Franz Volhard a développé un principe de « terre allégée » à base de paille mélangée à une barbotine argileuse.

TERRE ALLÉGÉE



LA TERRE EST LISÉE À LA MAIN.
 LA PLANÉITÉ EST VÉRIFIÉE À L'AIDE D'UNE GRANDE RÈGLE MÉTALLIQUE.
 UN ENDUIT EN TERRE, PARFOIS STABILISÉ À LA CHAUX AÉRIENNE, EST APPLIQUÉ LORSQUE LE MUR EST SEC.



TERRE ALLÉGÉE
HOUSE J
 ZARMSTADT, ALLEMAGNE - 2012
 Architects : SCHAUER + VOLHARD ARCHITECTEN



LA STRUCTURE EST MONTÉE SUR LE SITE. ELLE EST GÉNÉRALEMENT EN BOIS, MAIS ICI EN MÉTAL.
 LA TERRE EST MALAXÉE AVEC DE L'EAU (15 À 30 %) POUR OBTENIR UN MÉLANGE HOMOGÈNE À L'ÉTAT PLASTIQUE, AMÉLIORÉ ICI AVEC DE LA PAILLE.
 LE MÉLANGE EST PLAQUÉ À LA MAIN SUR LA STRUCTURE. ICI EN MAILLE D'ACIER.

HISTORIQUE
 Le torchis est l'une des plus anciennes techniques de construction. Apparu vers la fin du 10^e millénaire au Proche-Orient, il a été perfectionné par les cultures néolithiques du Danube avant de s'étendre aux régions boisées de l'Europe continentale. Il s'est aussi développé dans les zones tropicales humides d'Afrique et d'Amérique du Sud. Quelques sites sont classés au patrimoine mondial de l'UNESCO : centre médiéval de Strasbourg et de Provins en France, ville de Diamantina au Brésil, maisons ottomanes de Safranbolu en Turquie, tombes des rois Buganda en Ouganda.



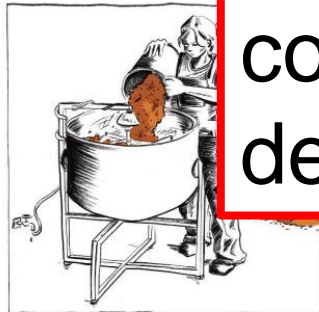
copyright TERRA-Award - Pauline Sémond (illustrations), Dominique Cauzon-Muller (textes) - 2016

TECHNIQUE

Les enduits en terre sont l'application la plus simple du matériau. Plus faciles à travailler que le plâtre ou le ciment, car ils séchent plus lentement, ils ne sont pas corrosifs pour la peau. Ils nécessitent les mêmes outils : gamates pour gâcher le mélange, truelles, taloches et lisseuses. Le corps d'enduit est souvent en terre sableuse, malaxée avec de l'eau afin d'obtenir une pâte visqueuse, qui s'étale aisément sur tous les supports. Il est parfois nécessaire d'amender le mortier avec des fibres végétales afin d'éviter les fissures. La couche de finition, épaisse de quelques millimètres, demande une terre plus fine.



LA TERRE EST TAMISÉE POUR NE PAS LAISSER LES ARGILES, LES SILTS ET LES SABLES FINS.



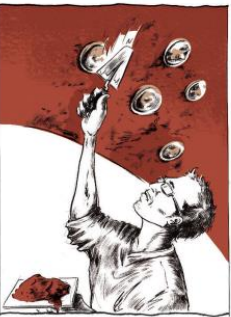
L'APPORT DE 15 À 35 % D'EAU PERMET D'OBTENIR UNE PÂTE VISQUEUSE. L'ADDITION DE SABLE ET/OU DE FIBRES VÉGÉTALES EST PARFOIS NÉCESSAIRE POUR ÉVITER LA FISURATION.



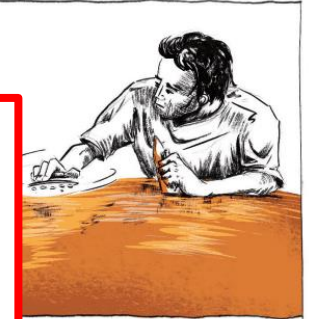
LE SUPPORT DOIT ÊTRE PRÉPARÉ AVANT L'APPLICATION DE L'ENDUIT : LE MUR EST GRATTE POUR UNE MEILLEURE ADHÉSION DU MÉLANGE, PUIS HUMIDIFIÉ.



Dans un grand nombre de techniques constructives la terre est associée à des matériaux biosourcés



LE CORPS DE L'ENDUIT SERT À BOUCHER LES TROUS ET À HOMOGENÉISER LA SURFACE. CE MÉLANGE TRÈS SABLEUX ET/OU FIBREUX DE 2 À 3 CM D'ÉPAISSEUR EST APPLIQUÉ AVEC UNE TALOCHE OU UNE TRUELLE.



LA DERNIÈRE COUCHE EST TRÈS FINE. ICI, LE MÉLANGE D'ARGILE, SABLE FIN ET CIRE A ÉTÉ APPLIQUÉ À LA TRUELLE ET POLI POUR OBTENIR UNE FINITION BRILLANTE.



L'ENDUIT DE FINITION PEUT AUSSI ÊTRE MIS EN ŒUVRE À LA MAIN.

OMICRON LIVING ROOMS

KLAUS, AUTRICHE - 2015
Concepteurs : ANNA HERINGER ET MARTIN RAUCH

HISTORIQUE

Les Japonais sont les maîtres incontestés de cet art, mais les enduits en terre ont une longue tradition sur tous les continents. Ils sont parfois sculptés de motifs géométriques ou donnent lieu à des dessins jouant sur la variété des couleurs naturelles : de l'ocre jaune au rouge, en passant par le noir. Entre Ghana et Burkina Faso, les décorations que les femmes kassena appliquent sur les murs de leurs maisons en sont une magistrale démonstration. Aujourd'hui, des sacs de terre à enduit prête à l'emploi, avec une vaste palette de textures et de teintes, sont facilement disponibles dans les pays industrialisés.



copyright: TERRA Award - Pauline Sémon (illustrations), Dominique Gauzin-Müller (textes)

La construction en terre dans le monde

- Environ 10% de la population mondiale vivait dans des constructions en terre en 2021 selon *Harsh et al.*

Great Mosque of Djenne (Mali)



Shibam (Yémen)



Lyon (France)



Four (near Lyon, France)



Farm Building (Lyon area) © Archilyon



Mayne Island, Canada

Mais....

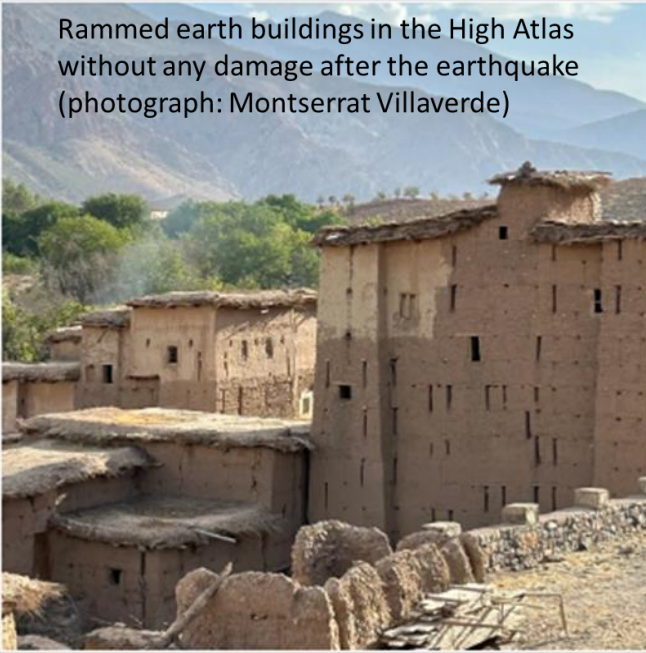


Durabilité de la terre ?



La question de la durabilité

Rammed earth buildings in the High Atlas without any damage after the earthquake (photograph: Montserrat Villaverde)



Earth building in Marrakech with restoration intervention after the earthquake (photograph: Montserrat Villaverde)



Séisme au Maroc, 8 septembre 2023

- Dégâts au patrimoine architectural considérables
- Constructions en terre, mais aussi en béton
- Causes de l'effondrement :
 - Proche de l'épicentre
 - Intervention ou "renforcement" avec des matériaux rigides incompatibles
 - Manque d'entretien
 - Mauvaise conception

La question de la durabilité

Besoin de quantifier les limites et les atouts du matériaux en tenant compte de ses spécificités

- Variabilité des procédures de mise en œuvre
- **Hétérogénéité du matériau**
- **Impact de l'eau (liquide et vapeur)**



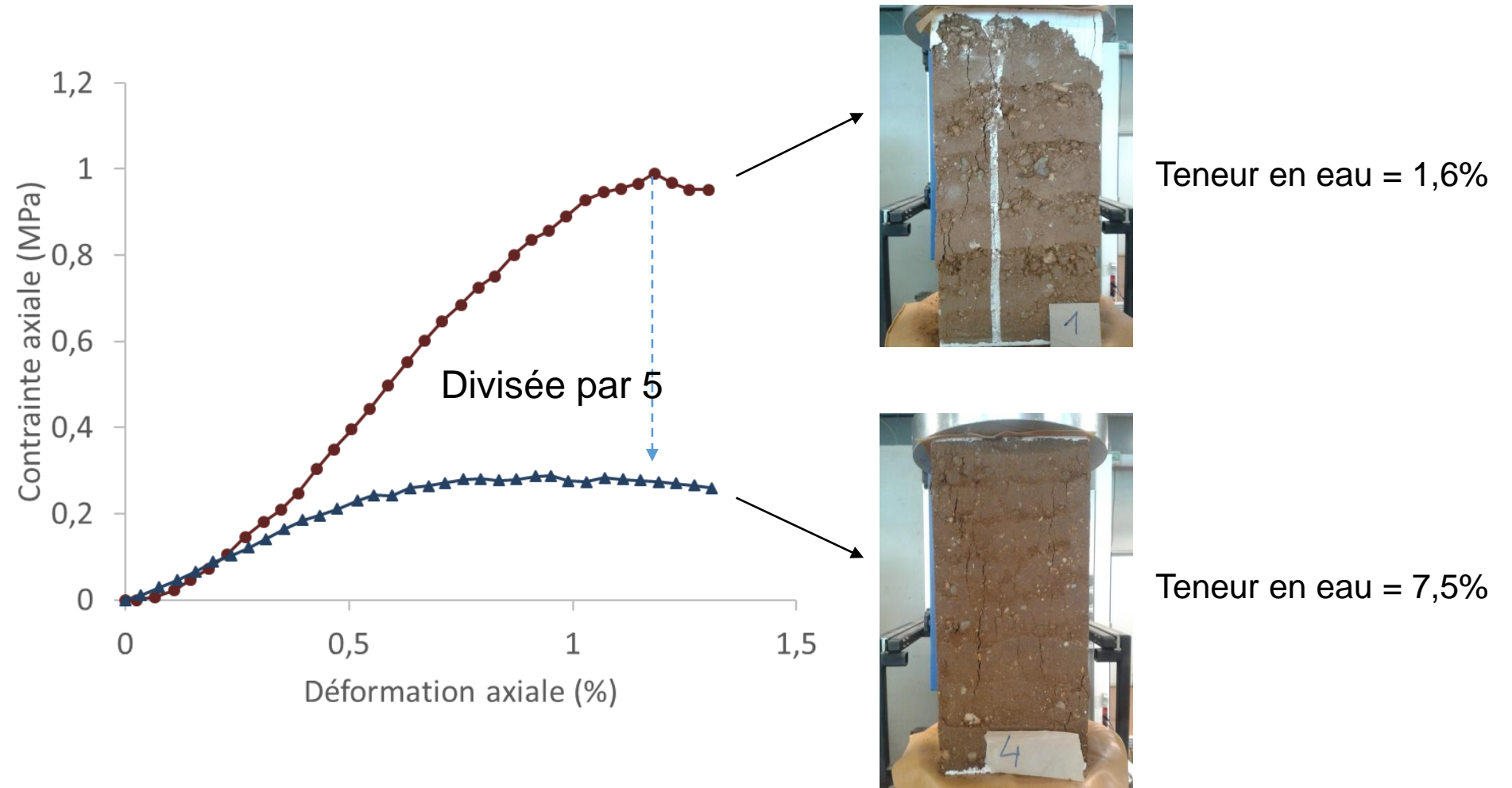
Le matériau terre nécessite une réglementation spécifique appropriée pour sa mise en œuvre et sa maintenance, ainsi que des tests spécifiques pour évaluer ses performances et sa durabilité

Lien entre teneur en eau et comportement mécanique



Comportement hydro-mécanique

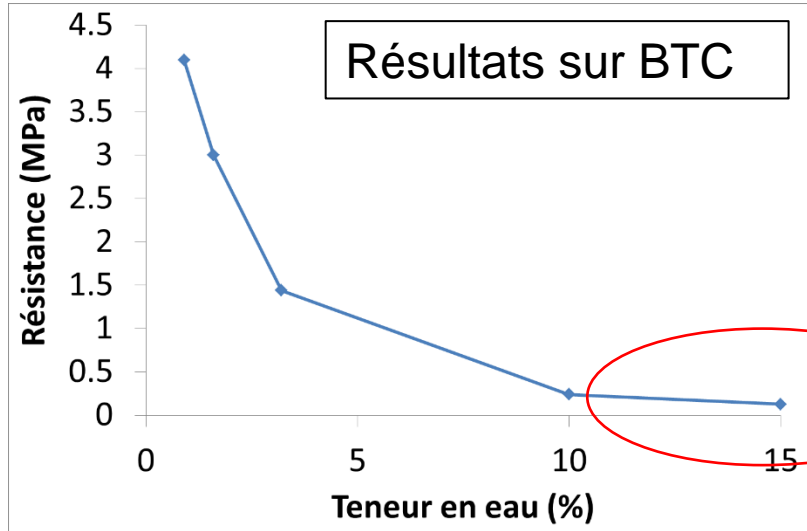
- Exemple sur échantillons de pisé



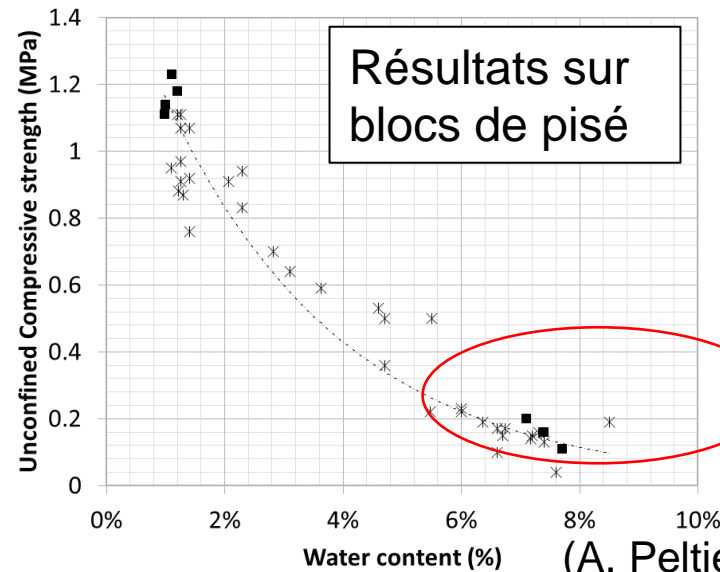
Pour information: Teneur en eau de fabrication $\approx 8,5\%$ pour ces échantillons

Comportement hydro-mécanique

➤ Evolution de R_c avec la teneur en eau



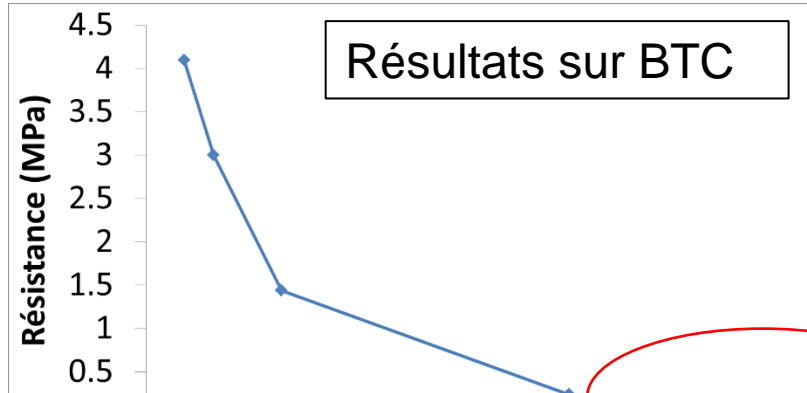
Teneurs en eau
« pathologiques »



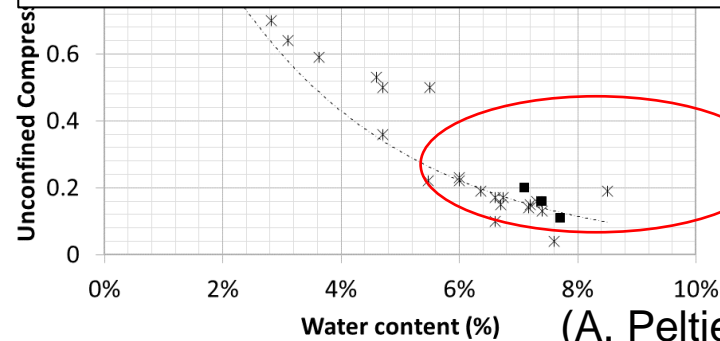
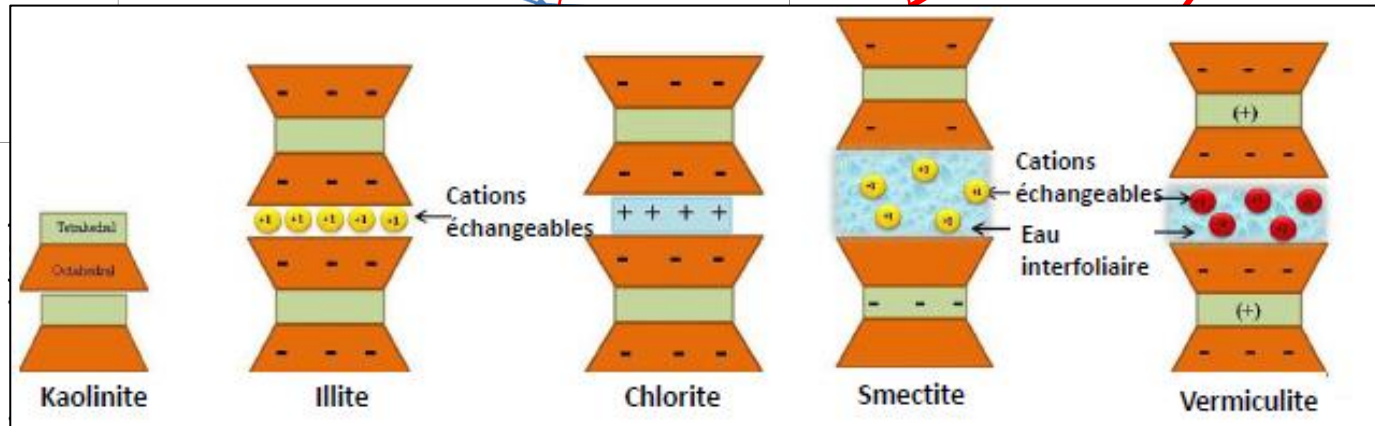
(A. Peltier et al., CSCM, 2022)

Comportement hydro-mécanique

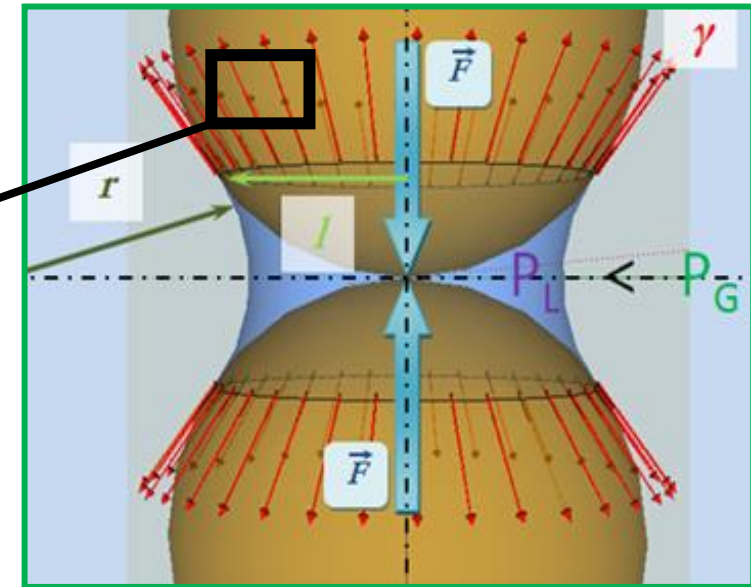
➤ Evolution de Rc avec la teneur en eau



Teneurs en eau « pathologiques »



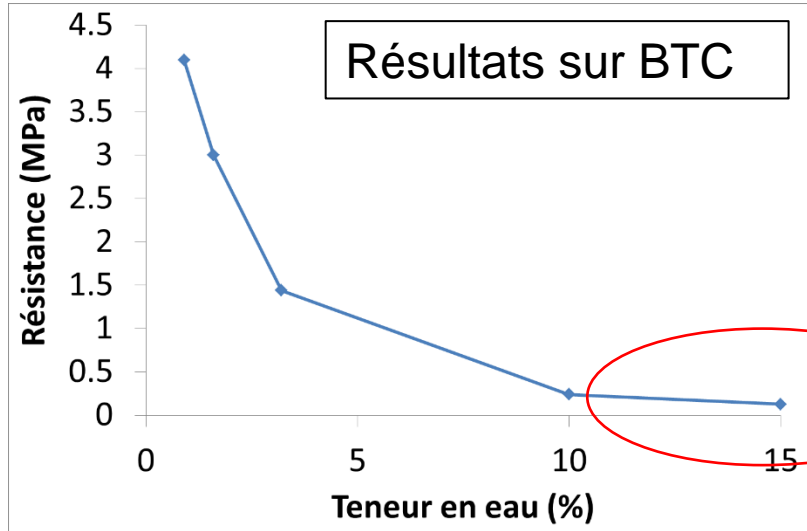
(A. Peltier et al., CSCM, 2022)



$s = P_G - P_L > 0$: succion matricielle

Comportement hydro-mécanique

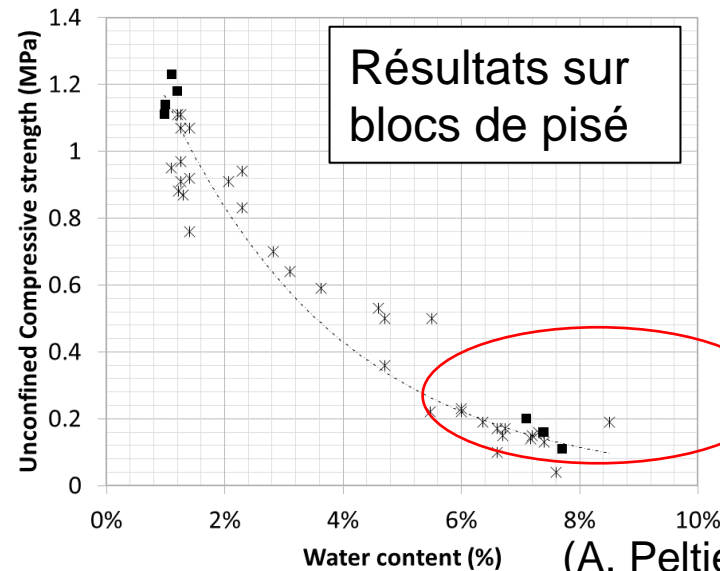
- Evolution de R_c avec la teneur en eau



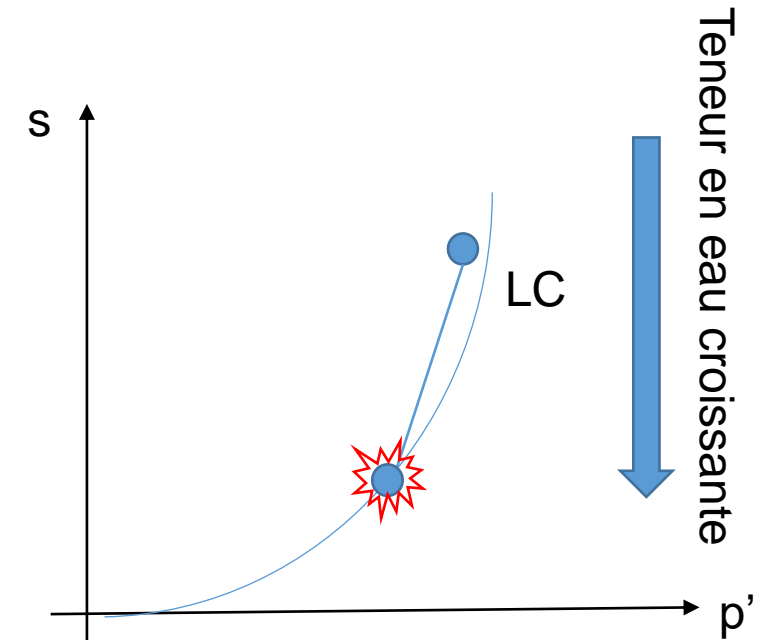
Teneurs en eau
« pathologiques »



- ✓ Problèmes d'effondrement au mouillage bien connus en géotechnique



(A. Peltier et al., CSCM, 2022)



(Xu et al., M&S, 2018)

Problématiques de durabilité



Observations in situ

COMPLET

Bauge
Brique de terre crue
Enduit en terre
Pisé
Terre allégée
Torchtis

**Guide des bonnes pratiques
de la construction en terre crue**

édition du 13 décembre 2018

Sous la direction d'un collectif composé de :
ARESD
ARPE Normandie
ASTORRE
ATOUTERRE
CAPEB
COLLECTIF TERREUX ARMORICAIN
FFB
Fédération des SCOP de BTP
MAISONS PAYSANES DE FRANCE
RESEAU Escobier
TERA

Riccardo Scarato architecte DPLG
Expert près la Cour d'Appel de Lyon

Jacky Jeannot architecte DPLG

Cahier d'expert Bâti en Pisé

Connaissance, analyse, traitement des pathologies
du bâti en Pisé en Rhône Alpes et Auvergne

Base d'un REFERENTIEL du bâti existant en pisé

1- Contexte, généralités, technique
2- Principes et analyse de l'Architecture en Pisé
3- Analyse pathologie Majeure du Pisé
4- Analyse risques et stabilité
5- Analyse autres Désordres et Pathologies du bâti en Pisé
6- Mesures conservatoires et préventives
7- Solutions
8- Exemples, Monographies
9- Synthèses, Résumés
10- Annexes

février 2013

P. Scarato, J. Jeannot, Sait ABITerre

Le Contenu de cette étude est notre propriété intellectuelle. L'utilisation de documents
doit comporter notre accord et ne doit pas avoir un but commercial, ni surtout expertal.



Observations in situ

Eléments architecturaux essentiels

Agents agressifs —> pathologies récurrentes

Débord de toiture / gouttière
Protège la partie supérieure du mur, évite l'infiltration d'eau en haut des murs

Nids d'animaux
—> Abrasion

Humidification —>
Développement de
microorganismes

—> Fissure de
décohésion

—> Stagnation d'eau

Menuiseries

Léger débord et pente pour éviter la stagnation d'eau

—> Craquelure de menuiserie
par mauvaise cohésion

Menuiserie sans
débord —> Erosion

—> Abrasion d'usure

Remontée capillaire
—> Subflorescence

Enduit

Protection, sacrificielle
ou non, pour limiter
l'érosion du mur

Rejaillissement (sol
imperméable) —> Erosion

Renforts

Eléments structuraux qui
consolident les parties fragiles

Soubassement

Limite les remontées
capillaires du sol, protège
des eaux de rejaillissement

Rehaussement de
chaussée, enduit
imperméable —>
Délamination d'enduit

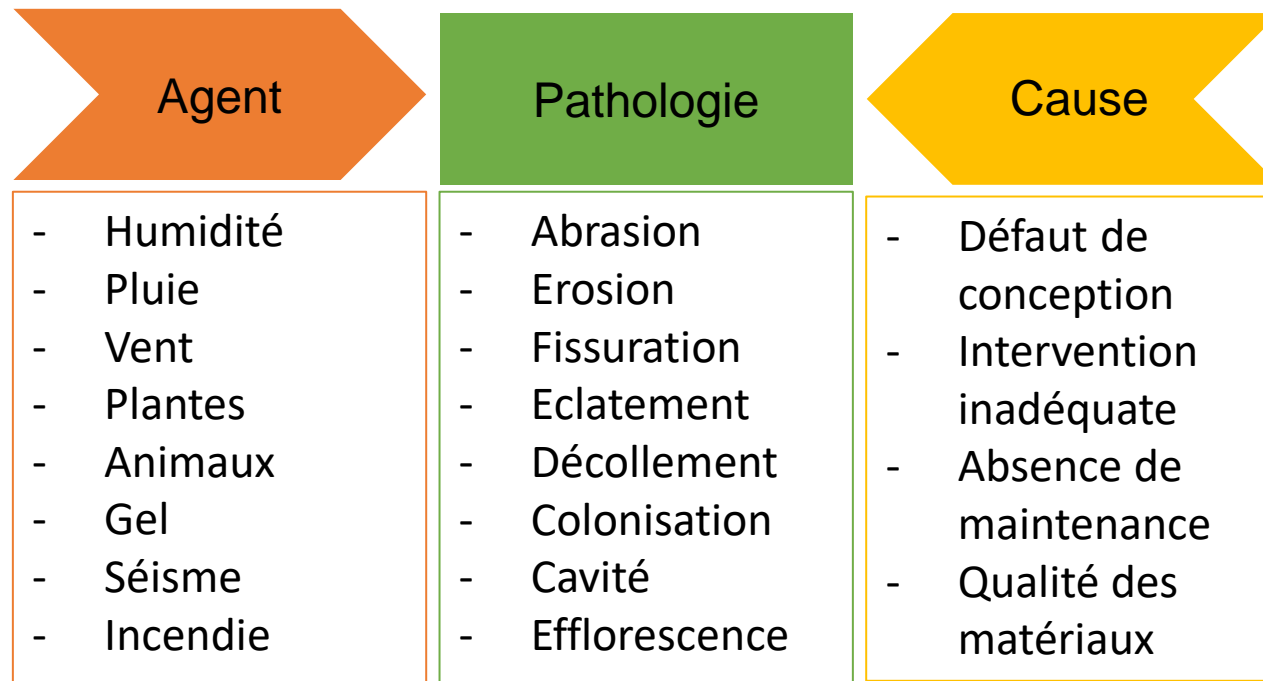
Gouttière abîmée
—> Erosion

Drain

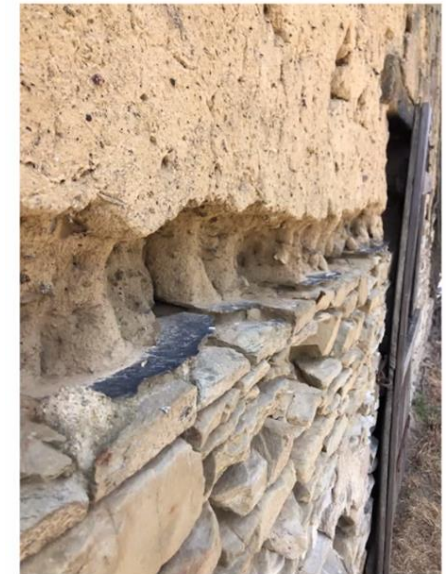
Evacuation de l'eau pour
éviter une stagnation et un
détrépage du mur

Observation in situ

Pathologies du bâti en terre



Souvent des agents combinés (eau + vent par exemple)
En laboratoire → souvent 1 seul ou 2 agents

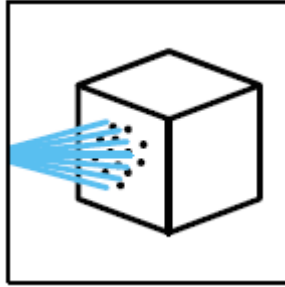


Erosion au-dessus d'un mur de soubassement

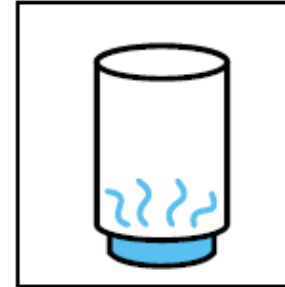


Effritement de maçonnerie

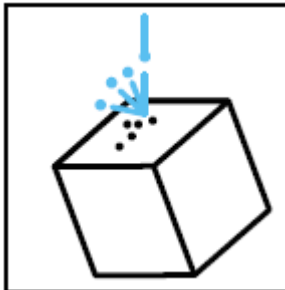
Essais de laboratoire - échelle matériau



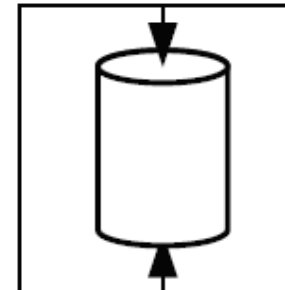
Essai d'érosion accélérée (jet ou pulvérisation)
Spray test / accelerated erosion test
NZS 4298, HB-195
—> érosion < 1mm/min
—> aucun échantillon non stabilisé ne résiste



Essai d'absorption (contact)
Capillary, suction, wet/dry appraisal tests
AS/NZS 4456.17, HB 195, NZS 4298, XP P13-901
—> masse d'eau absorbée, essai comparatif
—> adapté pour terre non stabilisée



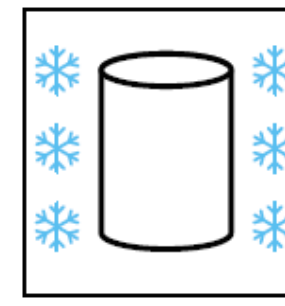
Essai à la goutte - Drip test
NZS 4298, HB-195, UNE 41410
—> critère en profondeur et diamètre
—> adapté pour stabilisé ou non et fibré
—> comportement à court terme



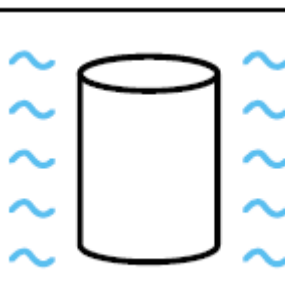
Résistance humide/sèche
Wet to dry strength ratio
XP P13-901
—> après immersion et séchage
—> critère > 0,33-0,5



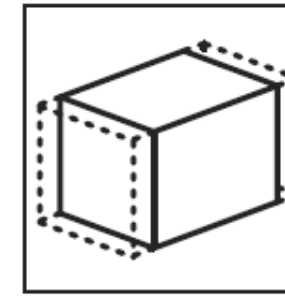
Essai d'abrasion - Wire brush test
ASTM D559, XP P13-901, IS 4332-4
—> mesure de la perte de masse
—> aucun échantillon non stabilisé ne résiste



Essai de gel-dégel - Freeze/thaw testing
XP P13-901
—> échantillon saturé ou non
—> perte de masse, résistance avant/après
—> pas de critère, bonne corrélation avec exposition naturelle



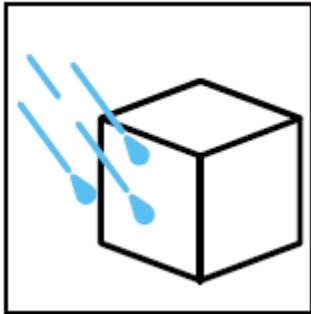
Essai d'immersion (ou absorption totale)
XP P13-901
—> % d'absorption d'eau ou perte de masse
—> aucun échantillon non stabilisé ne résiste
—> non réaliste sauf en cas d'inondation



Retrait de séchage - Drying shrinkage
—> indicateur de durabilité avec la présence de fissures —> voies d'infiltration préférentielles

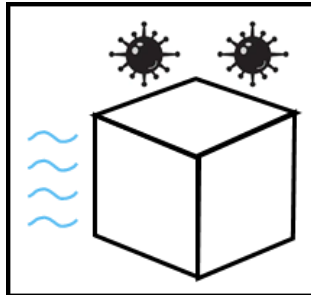
Essais de laboratoire

Echelle matériau



Simulation de pluie

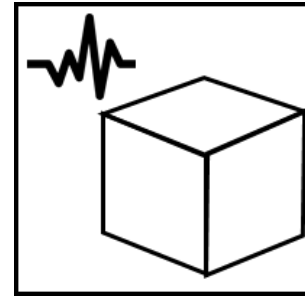
- > pulvérisation, proche de la pluie réelle
- > difficile à mettre en œuvre en labo, essai discuté



Prolifération de microorganismes

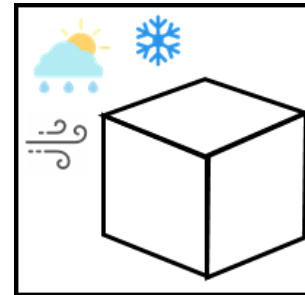
- > conditions sévères accidentelles
- > impact de la matière végétale

Echelle paroi



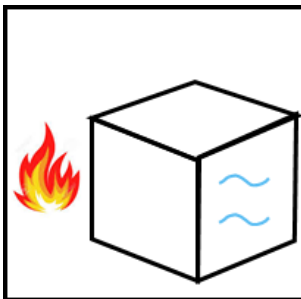
Essais sismiques

- > échelle de la paroi



Exposition naturelle en extérieur

- > échelle de la paroi
- > combinaison de différents agents
- > longue durée
- > corrélation avec essais accélérés



Réaction/résistance au feu

- > inflammabilité, résistance mécanique après haute température, isolation
- > impact de la matière végétale
- > échelle matériau et/ou paroi

Essais de laboratoire

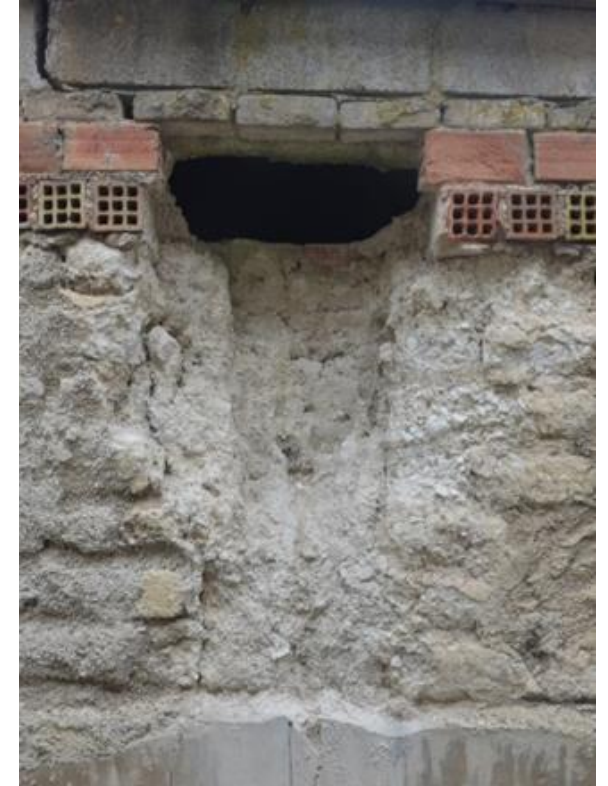
Objectifs : s'assurer de la durabilité d'un matériau face à diverses sollicitations, dans une **échelle de temps réaliste** pour des essais de laboratoire & comprendre les **mécanismes** de dégradation

- > essais accélérés, souvent plus sévères que la réalité
- > souvent au détriment de la terre non stabilisée
- > quels sont les critères de "durabilité" ?

Sensibilité de la terre à l'eau —> à l'origine de nombreuses pathologies du bâti
Multiplicité des essais de durabilité, certains normés, mais pas de consensus, pas de méthodologie unifiée

Essai d'immersion / érosion accélérée

- Si matériau résiste —> gage de durabilité ?
Non, phénomènes à court terme ou extrêmes (inondation, conditions cycloniques)
- Si matériau ne résiste pas —> gage de non durabilité ?
Non, preuve par le patrimoine bâti existant



Coulure de lessivage en-dessous d'une voie d'eau

Que se passe t'il aux températures négatives ?

Rappel

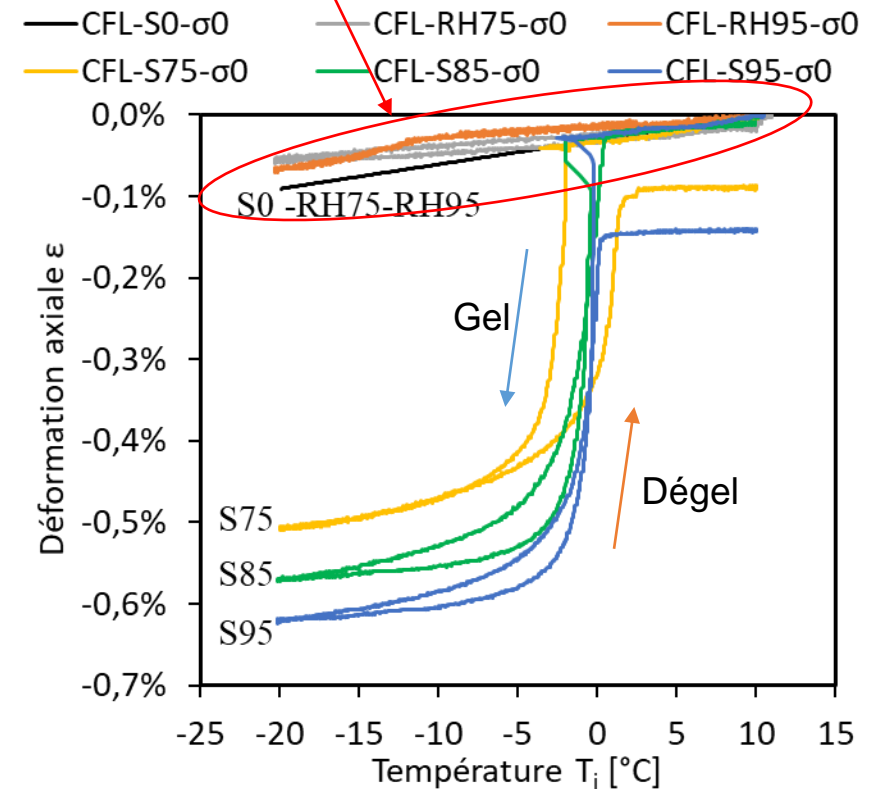
Essai de gel-dégel

XP P13-901

- > échantillon saturé ou non
- > perte de masse, résistance avant/après

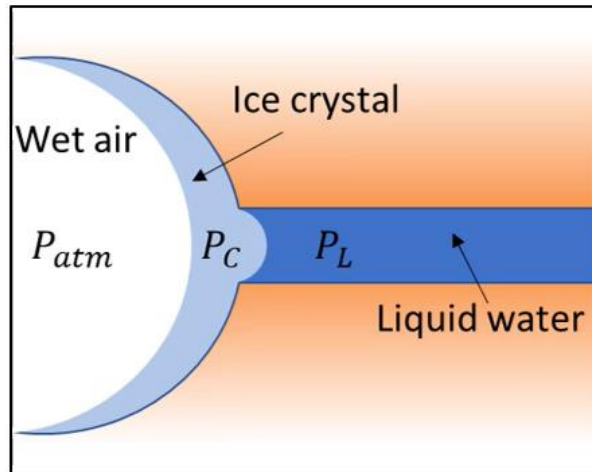


Contraction purement thermique



- ✓ Contraction et non gonflement durant le gel
- ✓ Présence de déformation (compaction) résiduelle après cycle de gel-dégel

Que se passe t'il aux températures négatives ?

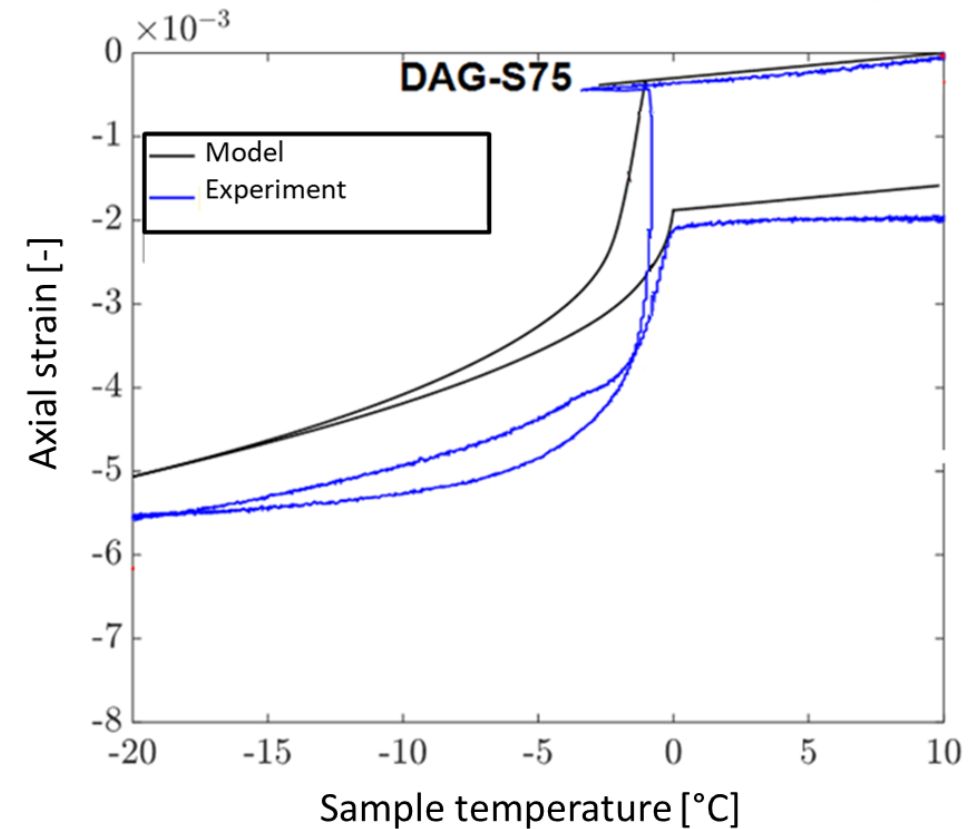


$$P_C \approx 0$$

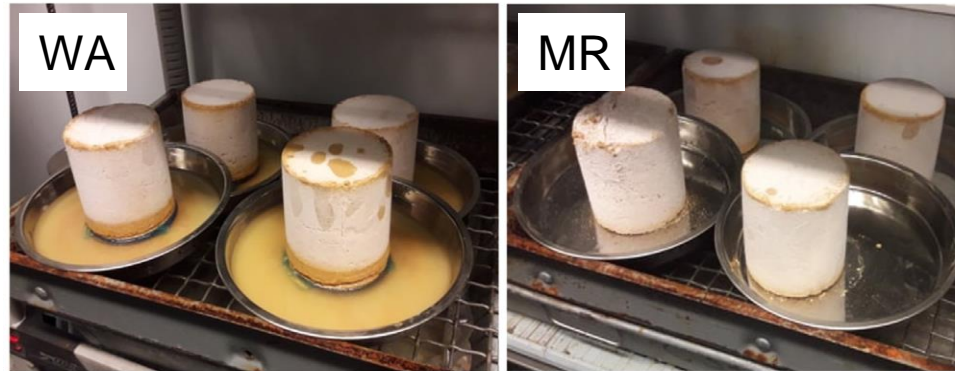
$$P_L = \Sigma_f \Delta T < 0$$

Approche poromécanique incrémentale

$$d\varepsilon = \frac{1 - 2\nu(S_C, S_L)}{E(S_C, S_L)} b(S_C, S_L) S_L dP_L + \alpha_{th} dT$$



Essai de gel-dégel avec apport d'eau



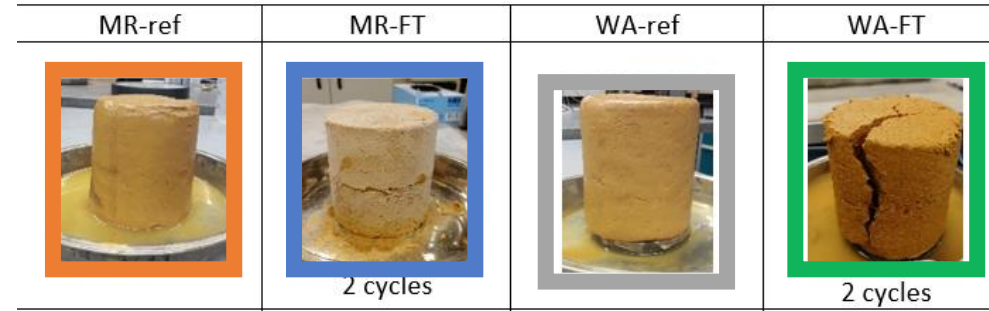
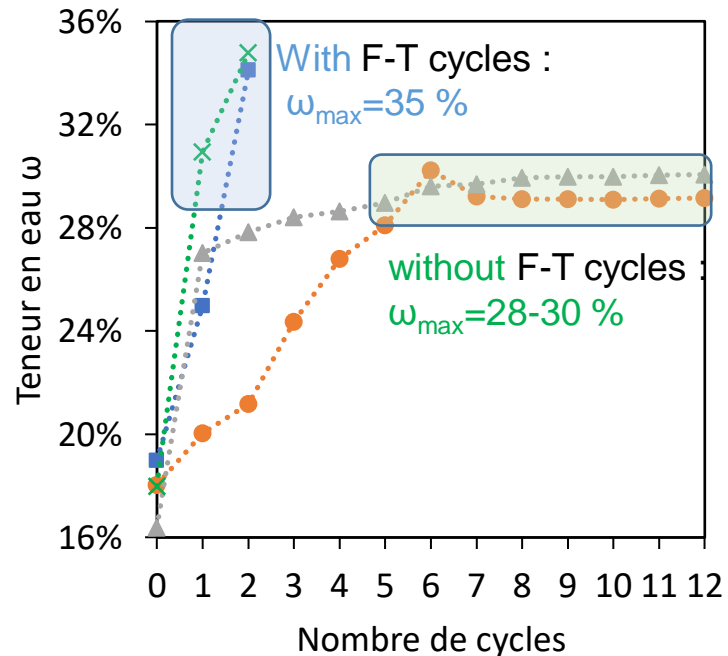
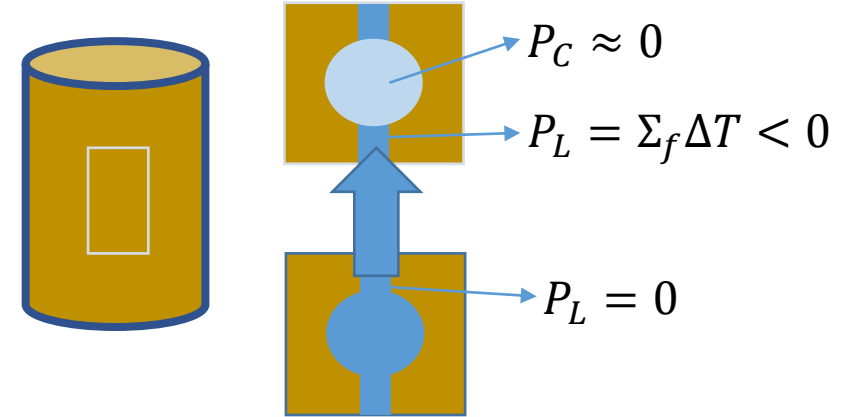
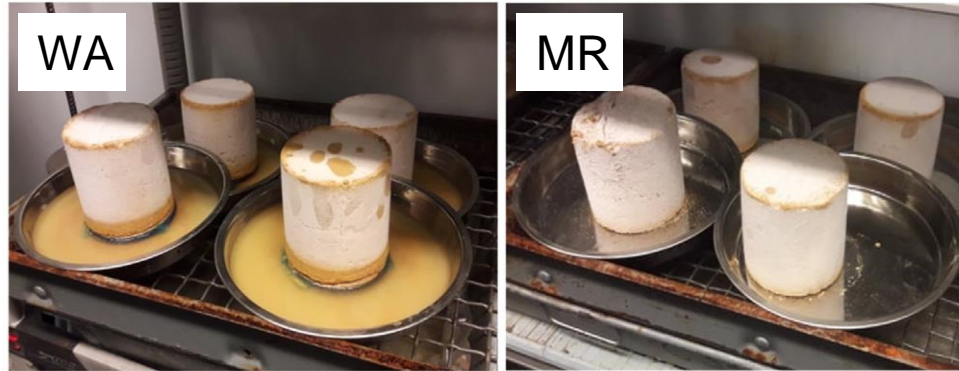
Echantillons soumis au gel-dégel

- Gel à -23°C pendant 24h
- Dégel à 23°C pendant 24h, soit dans une chambre à RH=100% (MR) ou en contact avec de l'eau (WA)

Echantillons de référence

- Scellés et stockés à 23°C pendant 24h
- Puis, pendant 24h, soit dans une chambre à RH=100% (MR) ou en contact avec de l'eau (WA)

Essai de gel-dégel avec apport d'eau



- Effondrement des échantillons soumis aux cycles de gel-dégel dès les premiers cycles.
- Augmentation de la teneur en eau des échantillons soumis aux cycles de gel-dégel.

Prolifération de microorganismes sur la terre crue biosourcée

Enjeu sanitaire majeur

Méthodes



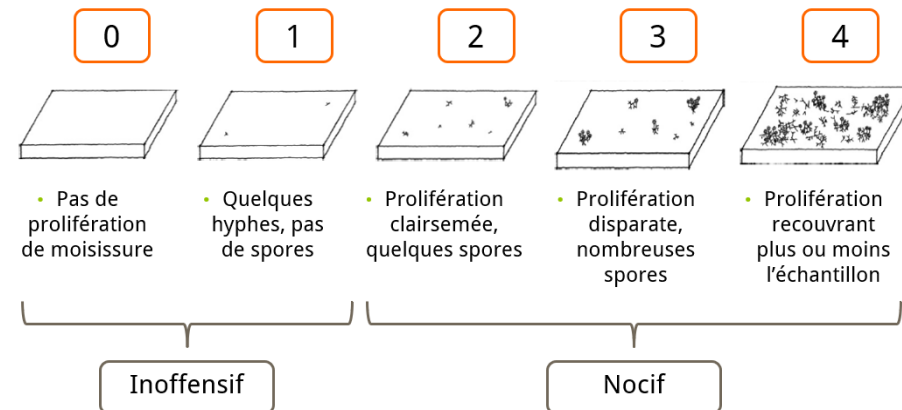
Prélèvement in situ

- Grattage au scalpel
- Récupération des microorganismes
- Mise en culture
- Incubation
- Identification et quantification des microorganismes en laboratoire



Echantillon en laboratoire

- Stérilisation ou non
- Inoculation ou non
- Incubation à diverses conditions
- Observation visuelle du développement
- (Analyse d'images)
- (Identification et quantification)



Prolifération de microorganismes sur la terre crue biosourcée

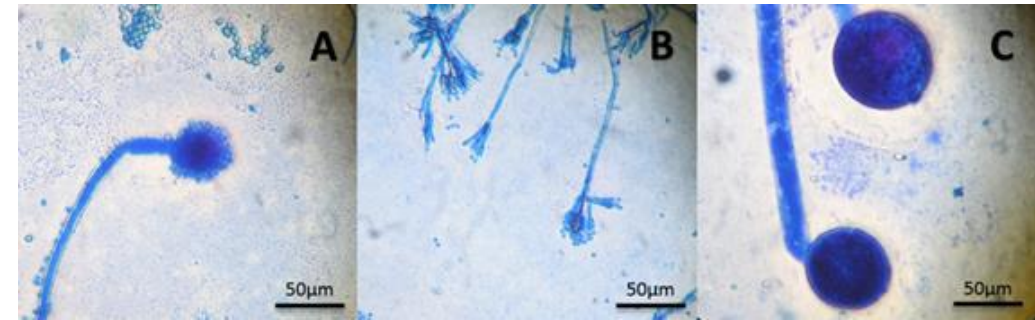
Résultats : prélèvements in situ

Identification et quantification de *bactéries* et *champignons*



Influence de la **composition** du support sur la densité microbienne

- Joint/adobe d'un même mur
- Présence de paille (torchis)



Observation d'*Aspergillus* sp. (A), *Penicillium* sp. (B) et *Rhizopus* sp (C)



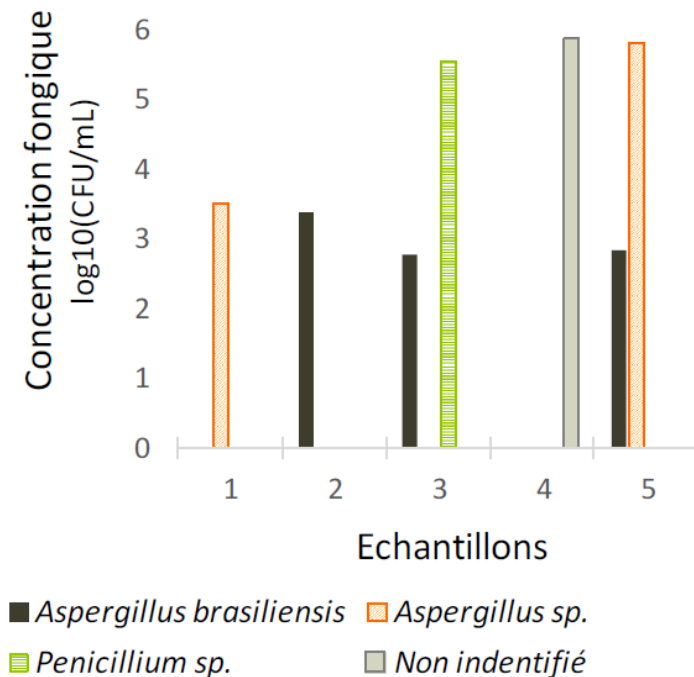
Influence de l'**historique** du site :

- Présence d'animaux (étables) → variation de densité et espèces selon les hauteurs de mur
- Eau liquide (problème de drain, remontée capillaire) → abondance fongique

Prolifération de microorganismes sur la terre crue biosourcée

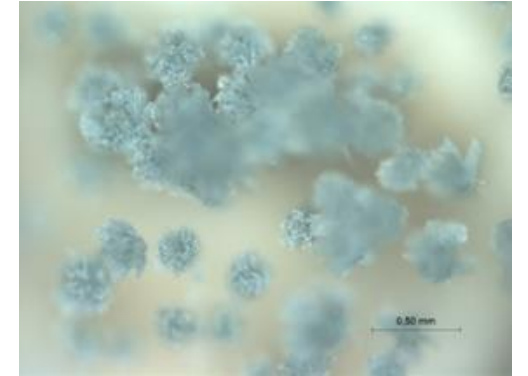
Résultats : échantillons de laboratoire

Quantification visuelle et identification après inoculation (*Aspergillus brasiliensis*) et incubation dans 6 différentes conditions (20 et 30°C, 76, 84 et 93% HR)

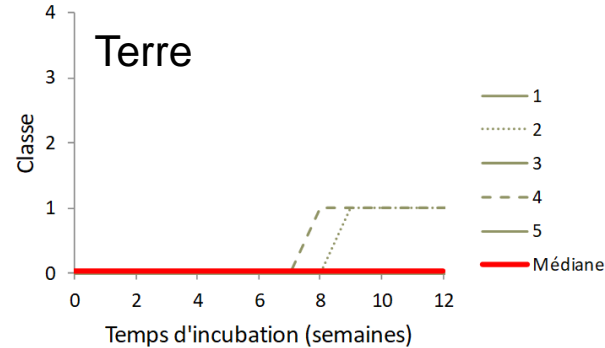


Prolifération observée uniquement après incubation à **30°C et 93% HR**

- Présence d'espèces différentes de l'inoculum
—> prolifération des espèces initialement présentes dans le matériau
- Pas de prolifération des témoins non inoculés
- Mais prolifération des témoins avec dépôt d'eau stérile
—> prolifération déclenchée par l'**ajout d'eau** liquide



Prolifération de microorganismes sur la terre crue biosourcée

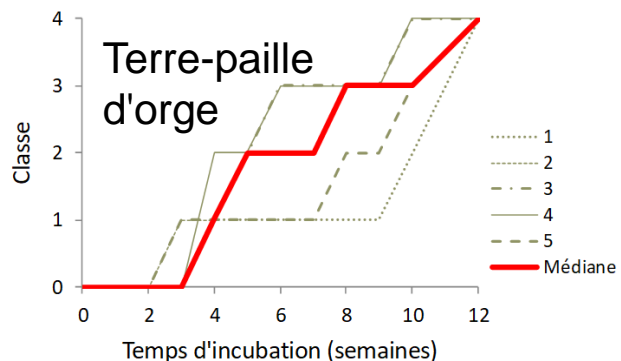
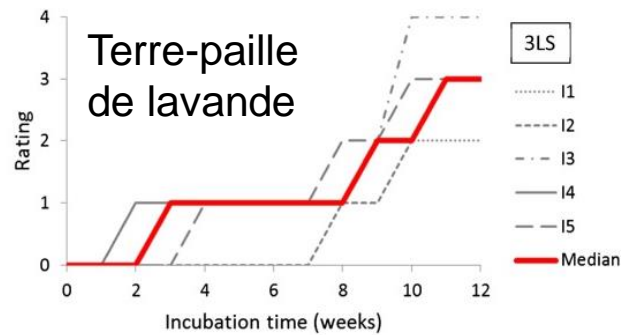


Résultats : échantillons de laboratoire

Conditions sévères (**30°C et 93% HR**)
pendant plusieurs semaines



Présence d'eau
liquide



- Terre biosourcée plus sensible au **développement microbien** que terre seule
- Sensibilité différente selon la **nature** de l'addition végétale
→ paille d'orge plus sensible que paille de lavande

Ajout de **matière végétale** augmente la sensibilité à la prolifération :

→ source de carbone favorisant la croissance

→ augmentation de la porosité du matériau : plus de surface disponible

Rilem Technical Committees



Pour nous rejoindre: assistant@rilem.org

MAE

Chairs : Antonin Fabbri and
Chris Beckett

Mechanical performance and
durability assessment of earthen
elements and structures

Development of testing
methods for the evaluation of :

- Mechanical performances
- **Durability**
- On-site evaluation

BEC

Chairs : Ana Bras and Céline Perlot

Bio-stabilised earth-based
construction: performance-approach
for better resilience.

- Understand how bio-additives
and **bio-stabilisation** methods can
modify :
 - The material (μ -structure,
minerology...)
 - its performances
 - Its environmental impact
 - Its **durability**
- Suggest a classification for
different types of bio-additives and
bio-stabilisation.

PEM

Chairs : Emmanuel Keita and
Arnaud Perrot

Processing of earth-based materials

- Describe the rheological
behavior of earth materials.
- Define the rheometric
characterization tools
suitable for earth materials
- Describe the curing and
early-age behavior.
- Describe new processing
methods

PN Terre

Chercheurs + praticiens de la construction en terre
9 axes de recherche



PNTERRE

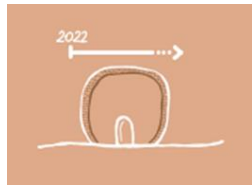
pascal.desjours@pnterre.fr



Comportement mécanique



Confort et efficacité
énergétique



Durabilité : échelle patrimoine
et laboratoire



Essais in situ



Impacts environnementaux



Réglementation



Sécurité incendie



Socioculture



Valorisation



That's all Folks !

Aurélie Laborel-Préneron alaborel@insa-toulouse.fr
Antonin Fabbri antonin.fabbri@entpe.fr