

FORMATION BÂTIMENT DURABLE

ECONOMIE CIRCULAIRE :
TERRE CRUE

PRINTEMPS 2022

Conception structurelle des ouvrages en terre crue

Quel est le rôle de l'ingénieur structure dans un dossier de construction écologique et circulaire ?

Cédric EVRARD





- ▶ Apprendre des leçons du passé
 - ▶ Aborder le matériau terre et ses techniques de mise en œuvre
 - ▶ Illustrer les outils de l'ingénieur
 - ▶ Pointer certains freins au développement
- ⇒ **Perspective d'un usage de la terre crue dans le contexte actuel**



FRANÇOIS COINTEREAUX : UNE LEÇON D'HISTOIRE

- ▶ Concepteur et constructeur
- ▶ Enseignant
- ▶ Chercheur
- ▶ Utopiste

MATÉRIAU

SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE

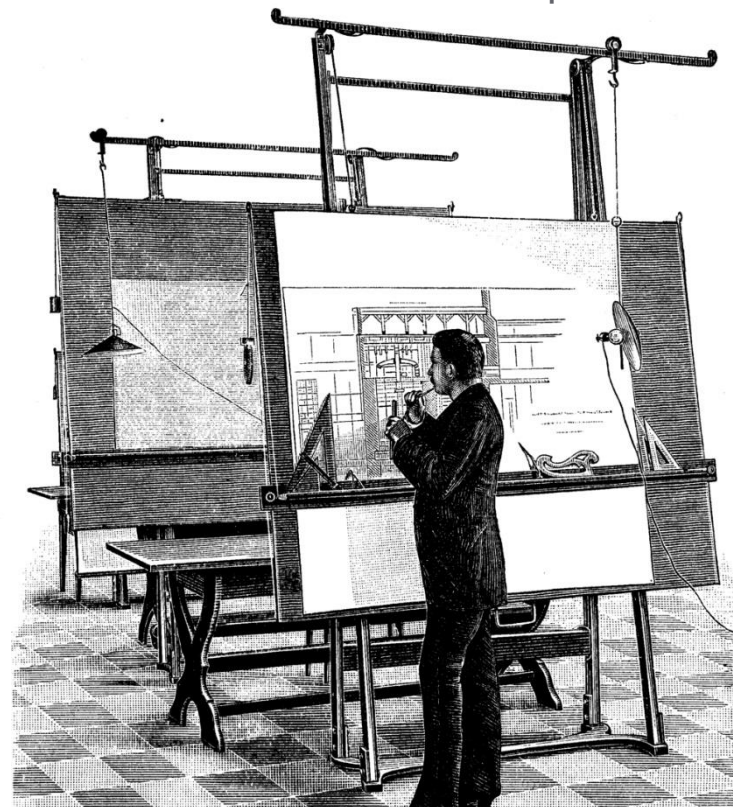
OBSTACLES POUR LE DÉVELOPPEMENT



4 FRANÇOIS COINTEREAUX (1740-1830)

Artisan et architecte autodidacte

- ▶ Un praticien devenu théoricien
- ▶ D'abord maçon lyonnais ensuite professeur d'architecture rurale autoproclamé



Source / Bron : Wikipédia

⇒ **Décloisonner les métiers**

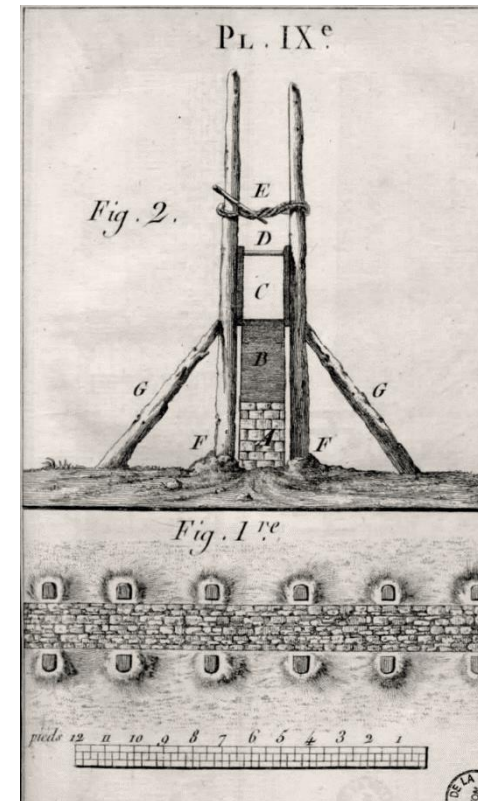
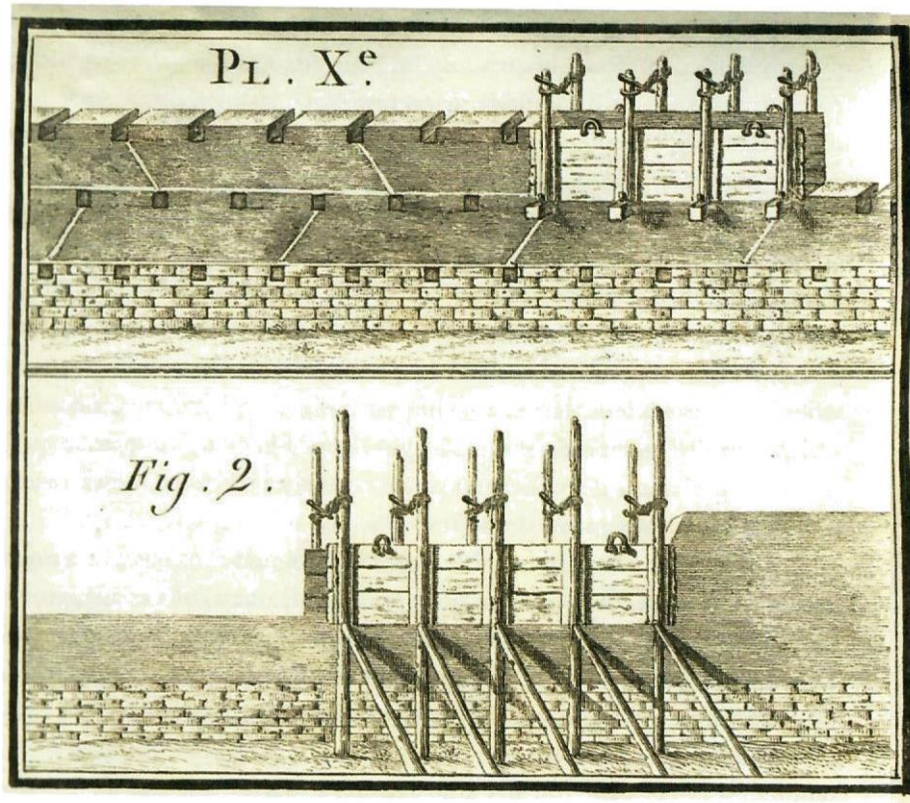
Reliefs du Campanile de Giotto



5 FRANÇOIS COINTEREAUX (1740-1830)

Auteur fécond, promoteur et vulgarisateur infatigable du pisé

- ▶ 1787 académie d'Amien : protéger du feu les bourgs et villages
- ▶ 1789 société d'agriculture de Paris : mémoire intitulé « la Ferme »
- ▶ 1790 premier des 72 cahiers de l'école d'architecture rurale.



⇒ Tradition modernisée

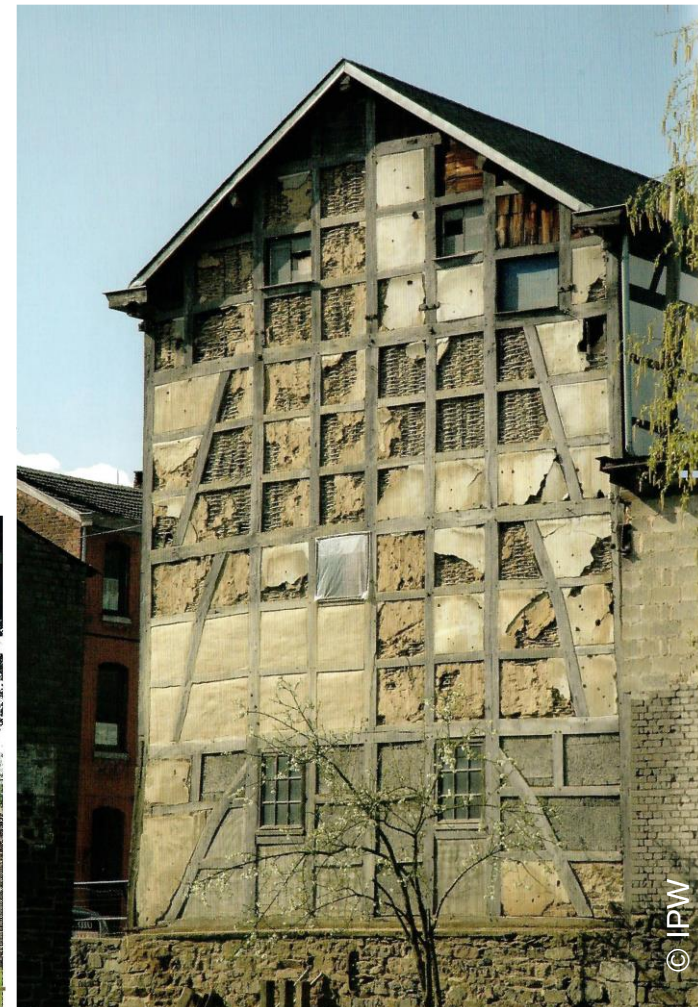
Source / Bron : Ecole d'architecture rurale,
Cointereaux



6 FRANÇOIS COINTEREAUX (1740-1830)

Tradition belge du moyen-âge jusqu'au XIX^eS

- Torchis
- Bauge



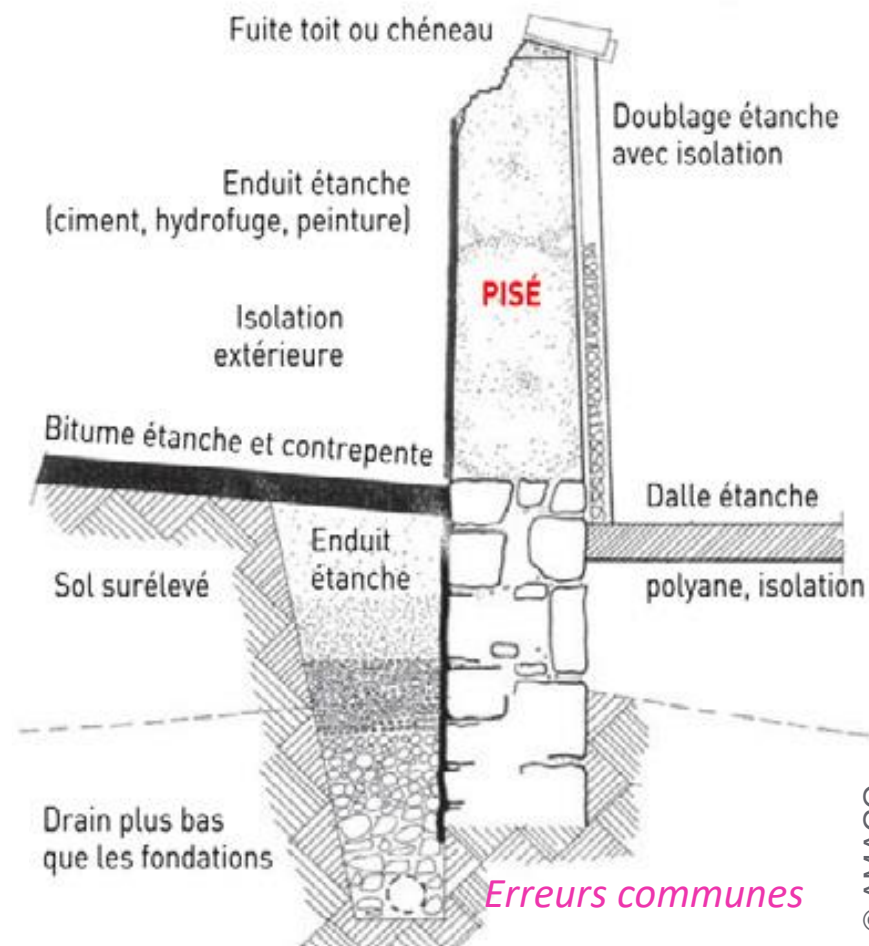
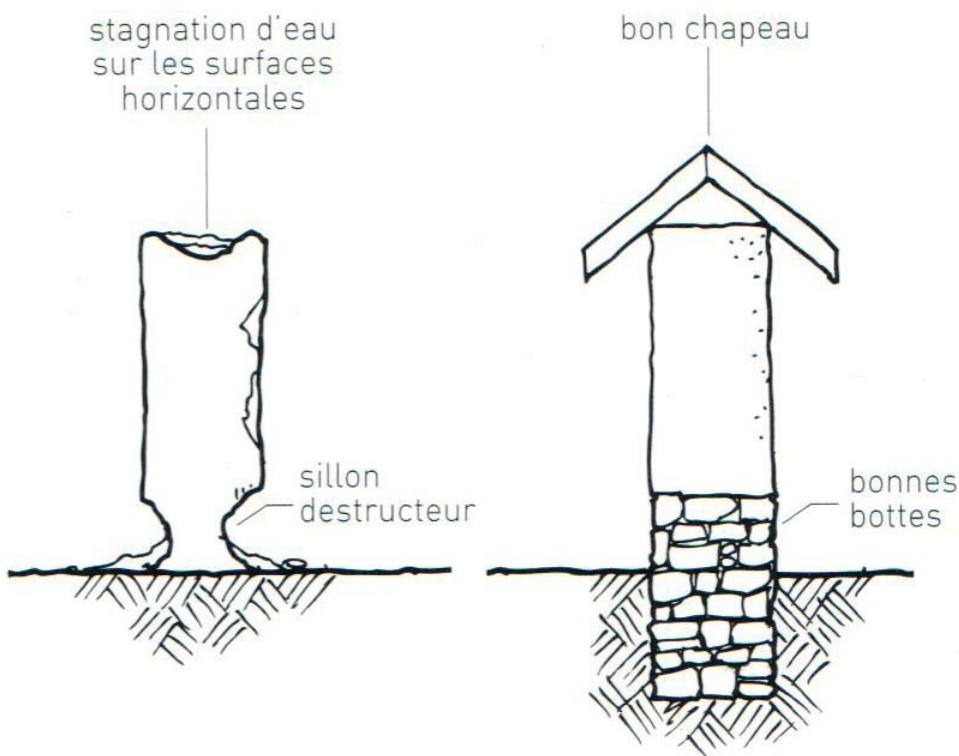
⇒ Etudier la tradition



7 FRANÇOIS COINTEREAUX (1740-1830)

Pathologies hydriques

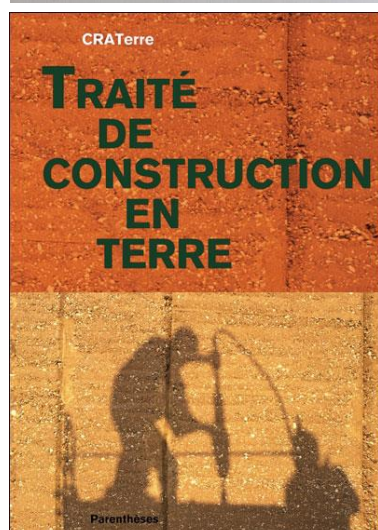
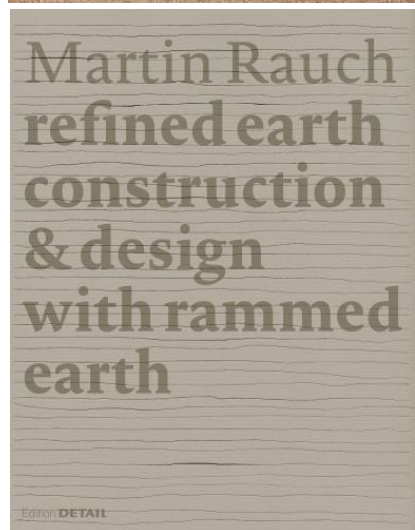
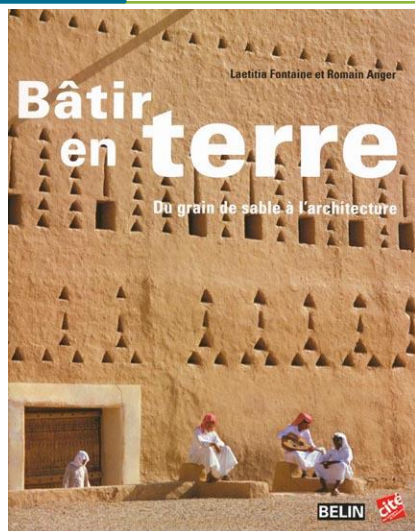
- ▶ Des bonnes bottes et un bon chapeau
- ▶ Attention aux matériaux étanches à la vapeur d'eau



⇒ Comprendre la tradition



8 FRANÇOIS COINTEREAUX (1740-1830)



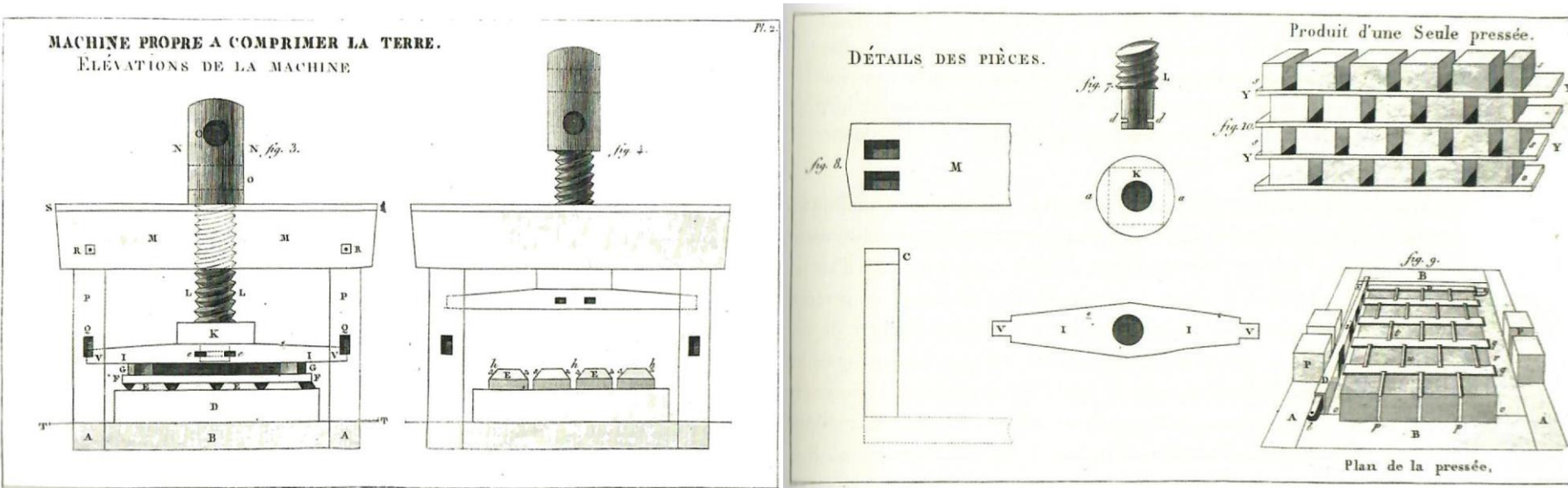
⇒ Diffuser

⇒ Former



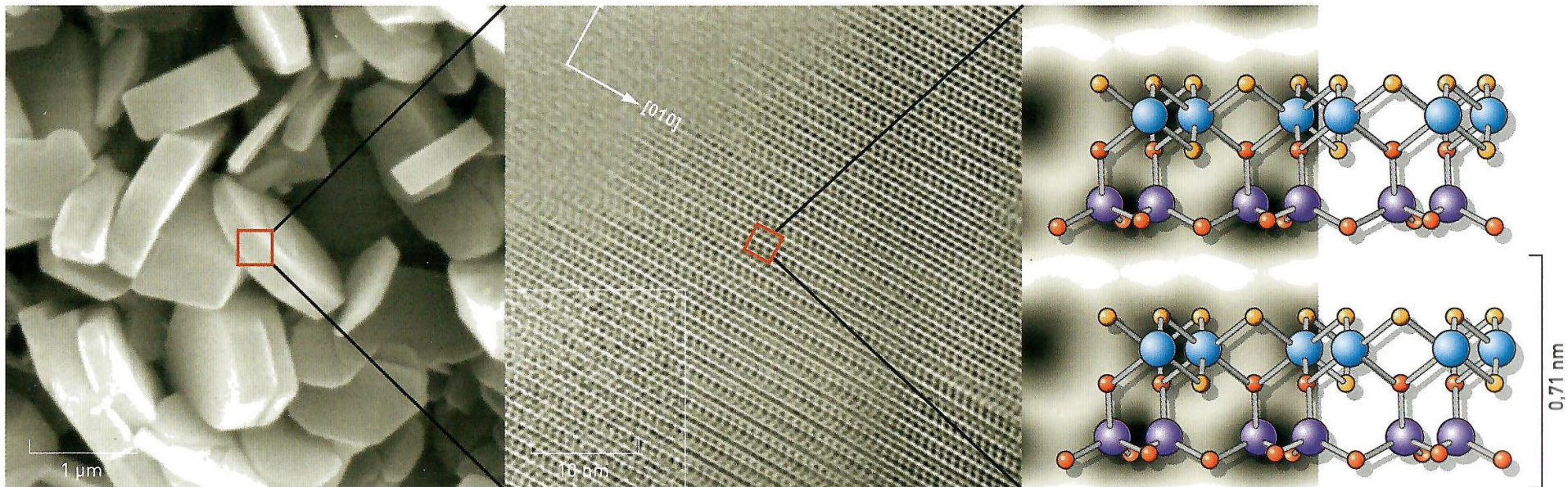
Inventeur, hérité des Lumières

- ▶ Nouveau pisé = pierres factices = BTC = précurseur du bloc béton
- ▶ Ses inventions sont à la convergence de l'architecture et de l'agriculture.



⇒ Innovation

Domaine de recherche novateur en pleine expansion



⇒ Recherche fondamentale



Un nouvelle science : l'AGRITECTURE (1797)

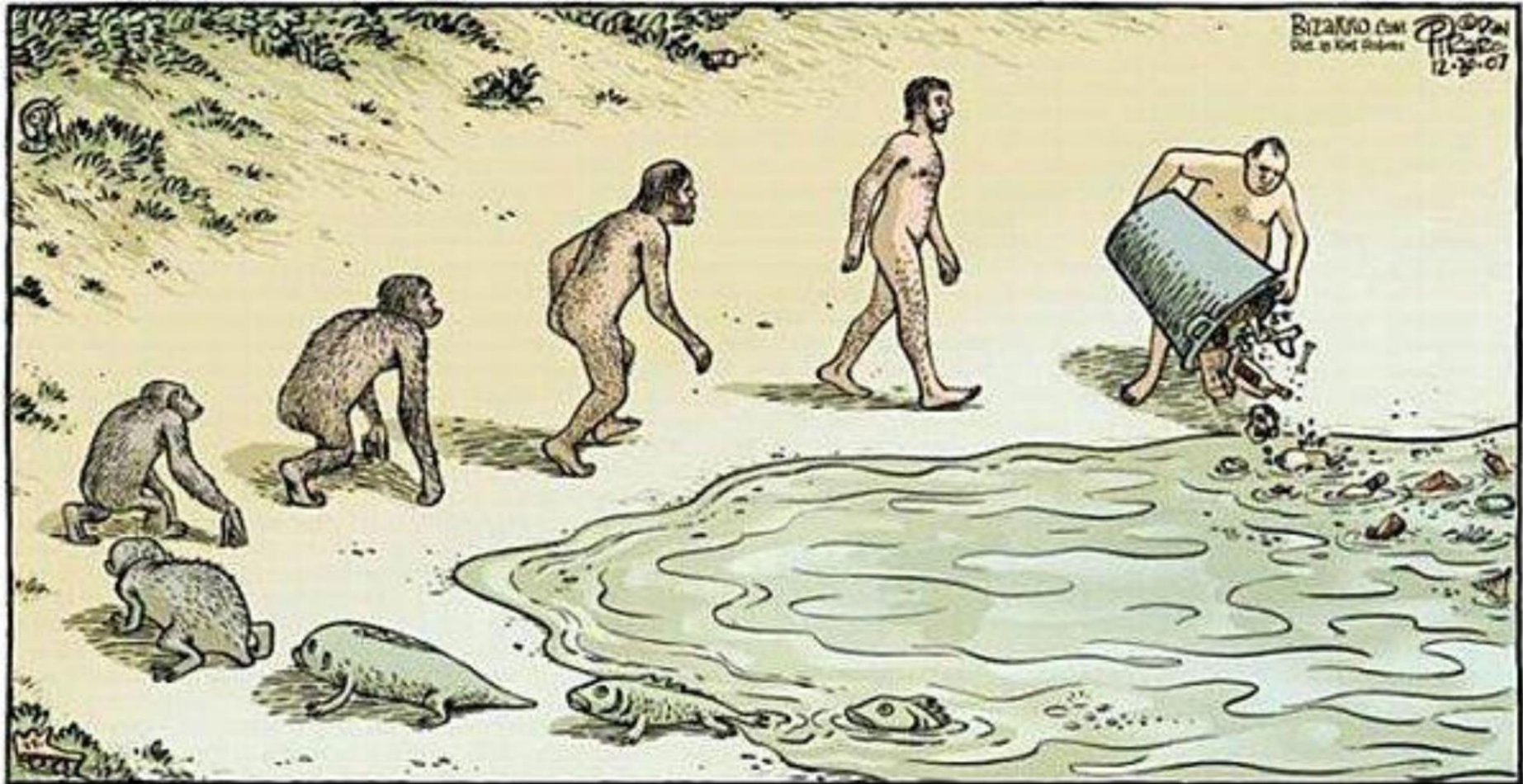
- Architecte de la classe populaire : seul bâtisseur parlant au nom du monde agricole
- « La profession de bâtir et de cultiver doit être exercée par une même personne ».



⇒ Prendre soin de la Terre



Cycle de vie

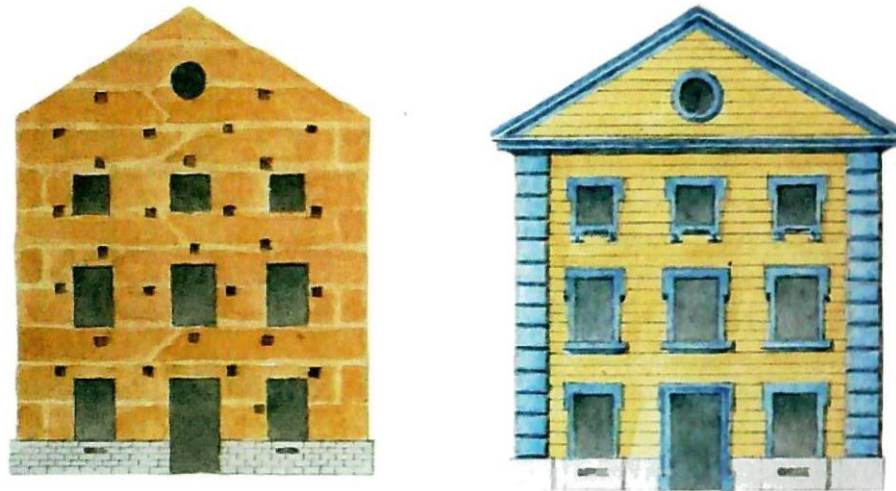


⇒ Il faut que ça s'arrête !



Mal aimé des ses contemporains

- ▶ Nombreux refus de la société des inventions et découvertes
- ▶ L'empereur condamne les réalisations à La Roche-sur-Yon : l'or a été changé en **ville de boue**



⇒ **Réalisme financier**
⇒ **Responsabilité et risque**



Mythe de la modernité, lobbys, ...



⇒ Revoir nos comportements individuels et collectifs



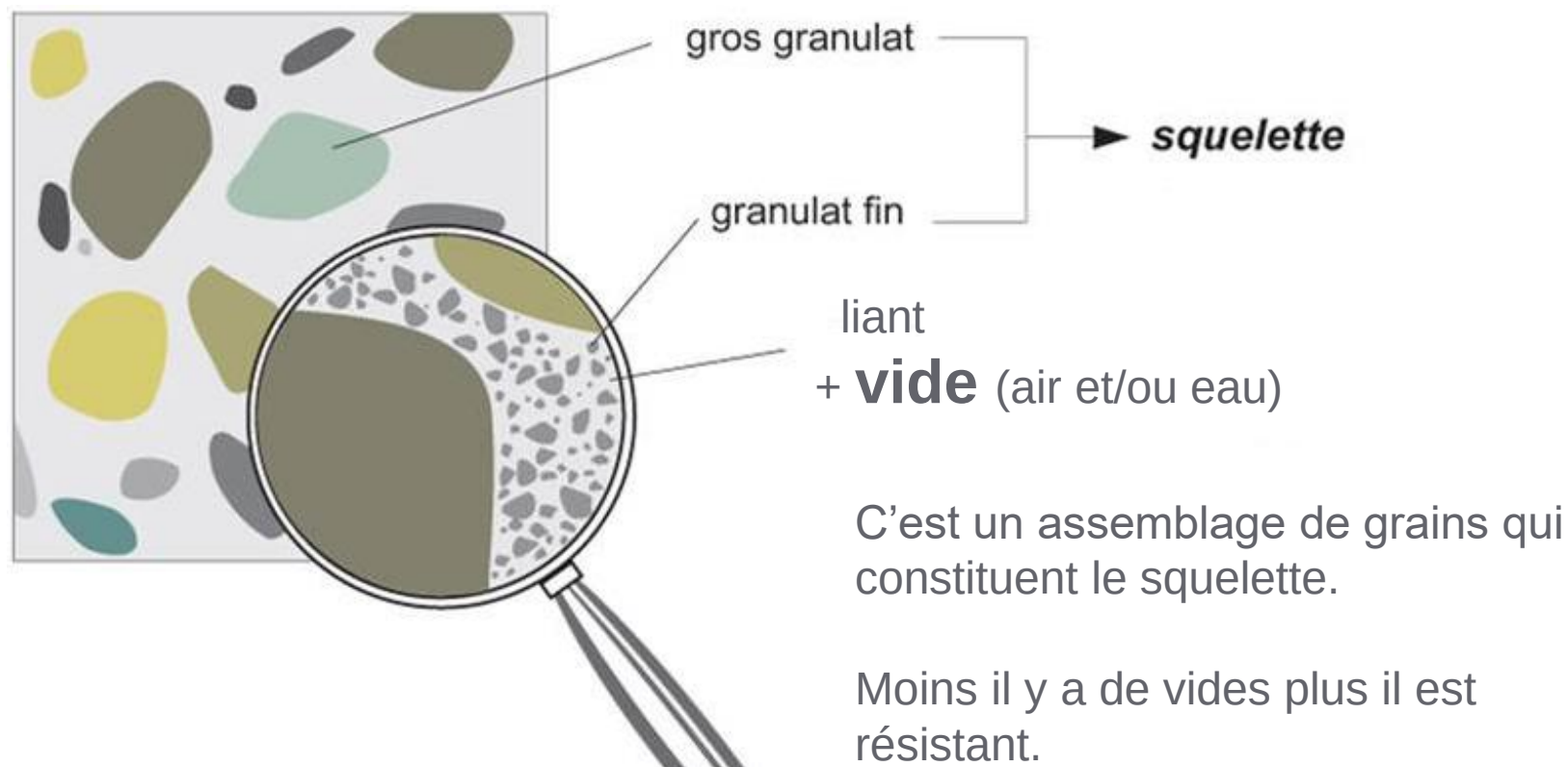
FRANÇOIS COINTEREAUX : UNE LEÇON D'HISTOIRE **MATÉRIAU**

- ▶ **Grains**
- ▶ **Eau**
- ▶ **Liant**
- ▶ **Techniques de construction**

SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE OBSTACLES POUR LE DÉVELOPPEMENT



La terre, un assemblage de matériaux de nature minérale.



⇒ **Ça ressemble à du béton !**



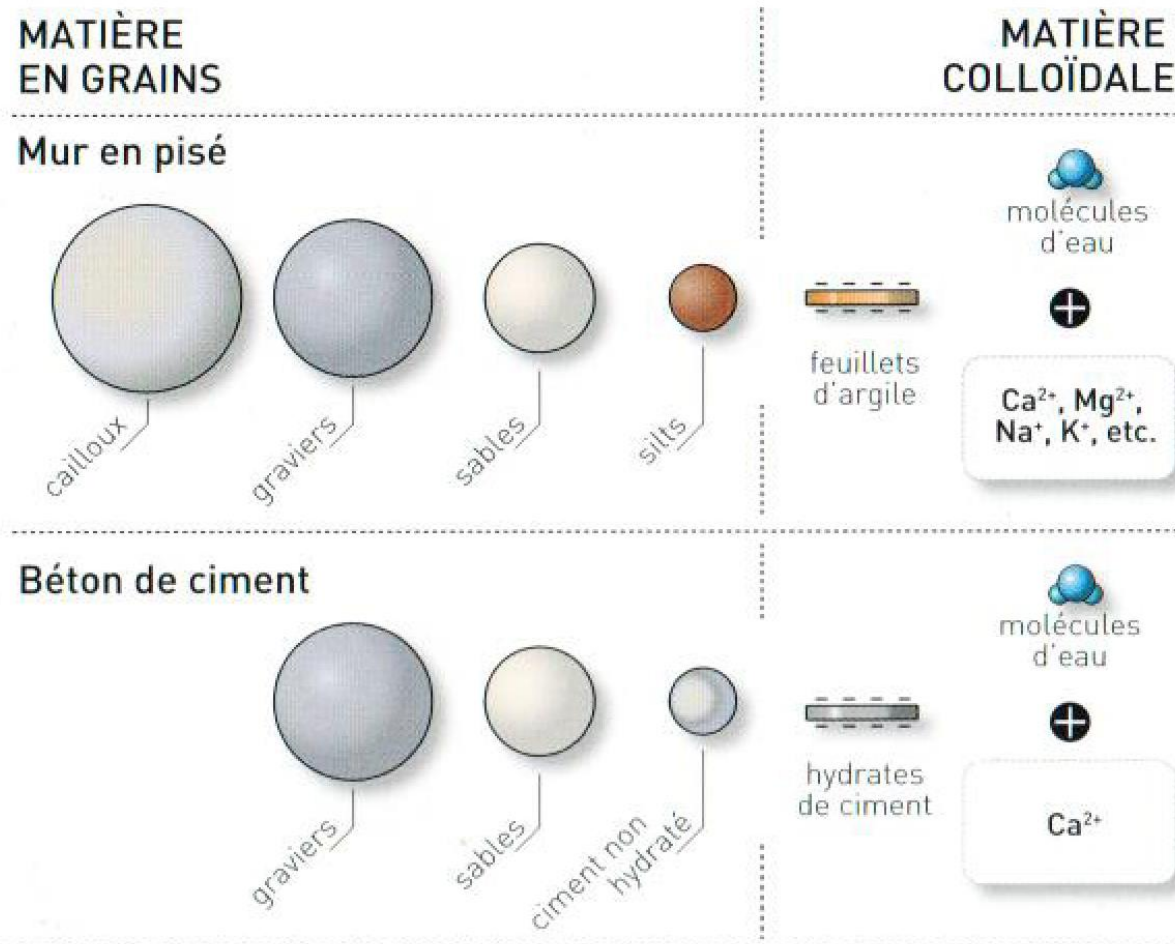
Comparaison au béton : composition du mélange

Granulats ou agrégats :
matières inertes (gravillons,
sables, ...)

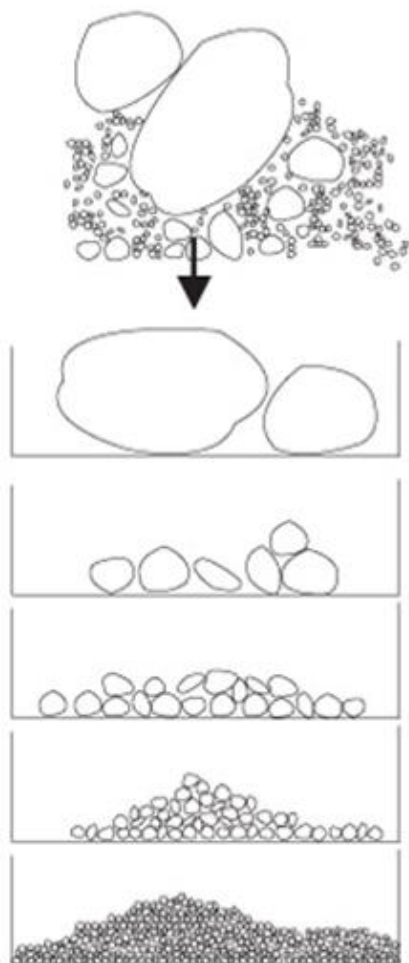
Liant : matière susceptible
d'en agglomérer d'autres
(ciment, chaux, argile,...).

Eau : nécessaire pour
obtenir une pâte, à
l'homogénéité variable.

Adjuvants : modifient les
propriétés physiques et
chimiques du mélange



Grains



⚠ diamètres et distribution...

D

Cailloux	entre 20 cm et 2 cm
Graviers	entre 2 cm et 2 mm
Sables	entre 2 mm et 63 μ m
Silts (limons)	entre 63 μ m et 2 μ m
Argiles	au-dessous de 2 μ m

Les silts ou limons sont des sables très fins imperceptibles au touché, on les appelle aussi fines.

Les argiles sont si petits qu'ils ont un comportement particulier, une sorte de colle : ce sont des **liants**.

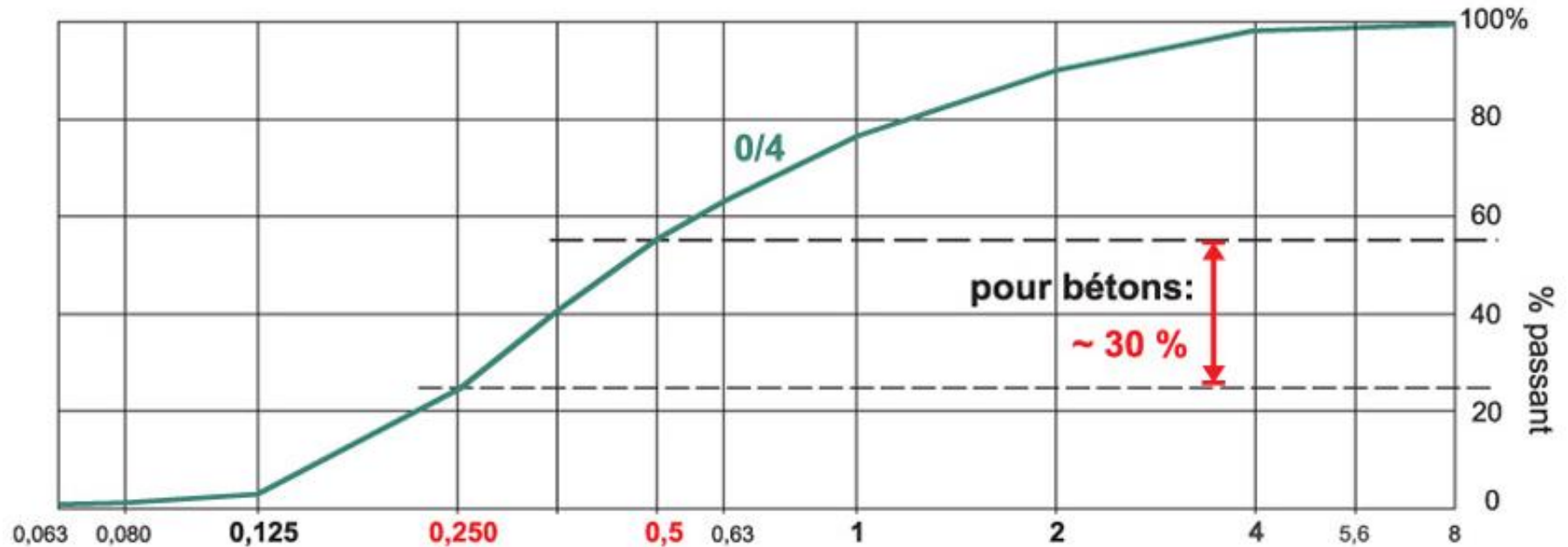
d

⚠ fines (< 63 microns)

"consomment" l'eau de gâchage



Courbe de granulométrie



sable fin



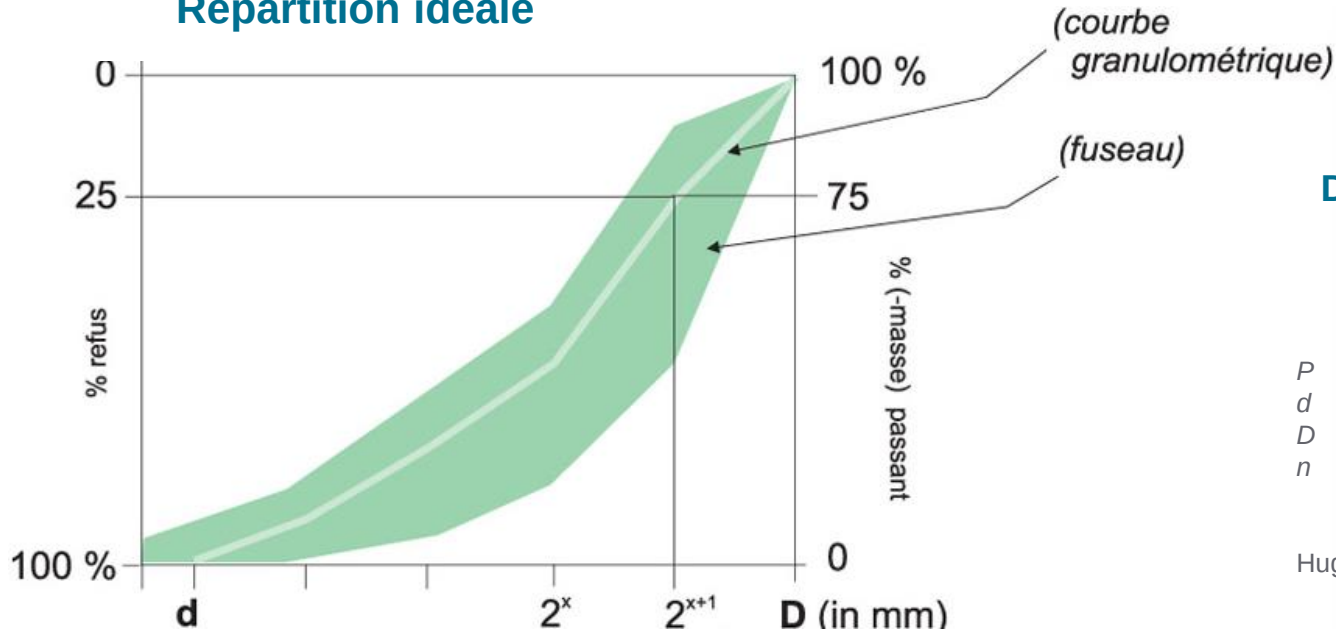
sable de béton



sable gros



Répartition idéale



Distribution théorique idéale

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n$$

P proportion du grain d'un certain diamètre

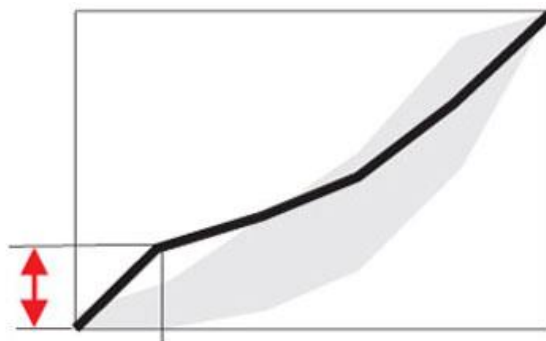
d diamètre du grain

D le plus gros diamètre

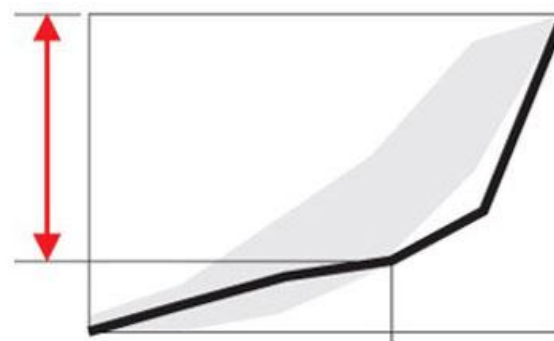
n coefficient : 0,5 = grains sphériques

0,20 - 0,25 = grains avec formes aléatoires

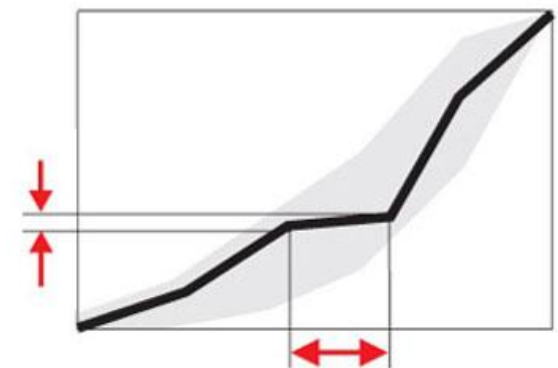
Hugo Houben, traité de construction en terre



trop de granulats fins



trop de gros granulats

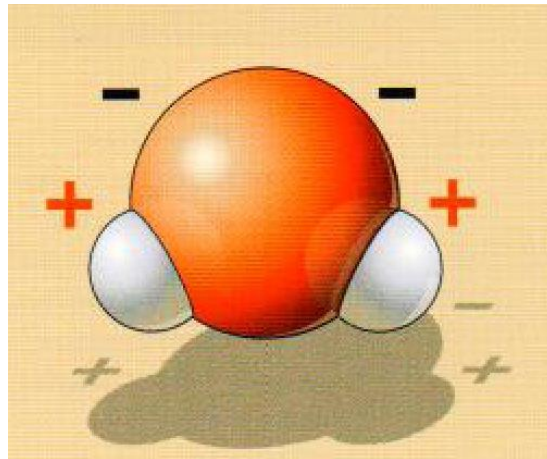


une fraction manque

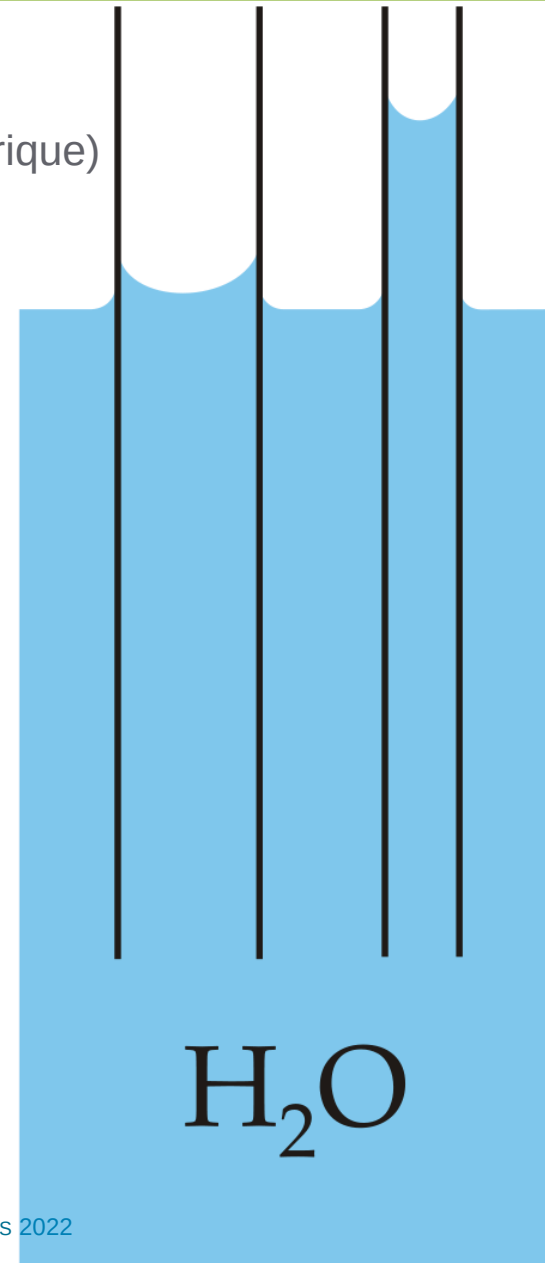


L'eau

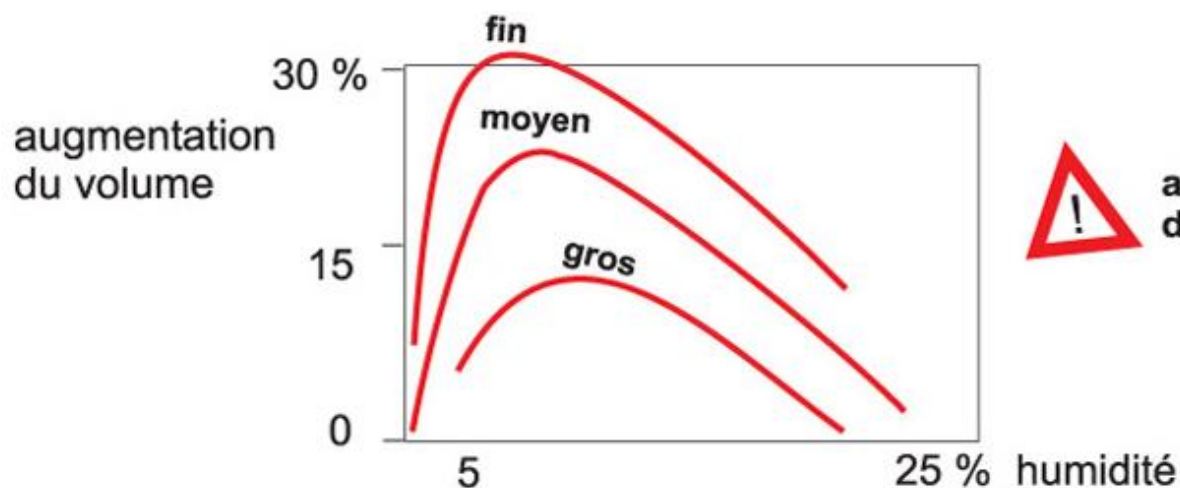
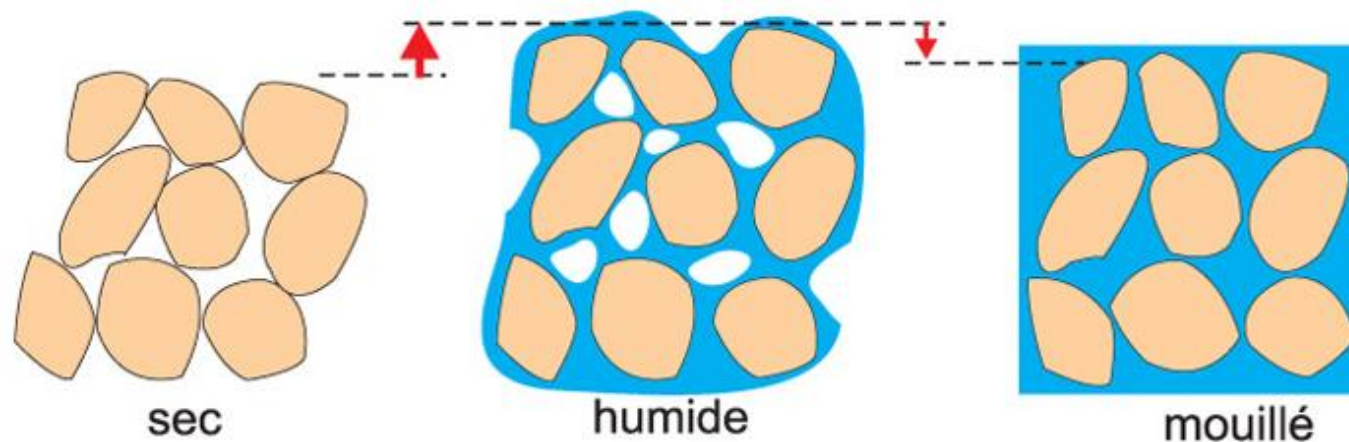
- ▶ La molécule d'eau est une molécule polarisée (dipôle électrique)
- ▶ Cela crée des liaisons appelées « liaisons hydrogène »



- ▶ La capillarité de l'eau est due aux liaisons hydrogène
- ▶ Propriétés :
 - liquide entre 0 et 100°C
 - état solide (glace) de densité plus faible l'état liquide
 - solvant polaire
 - grande inertie thermique



Influence des liaisons hydrogènes sur les grains de sable

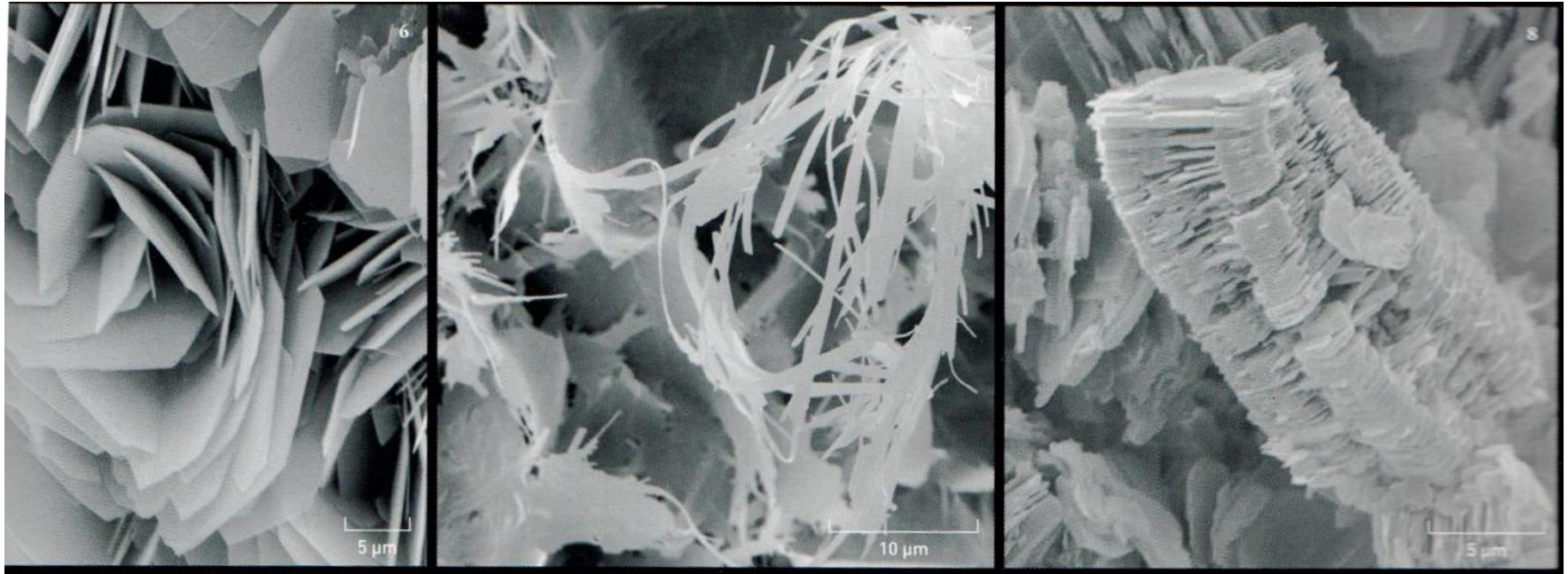


attention en cas de dosage en volume !



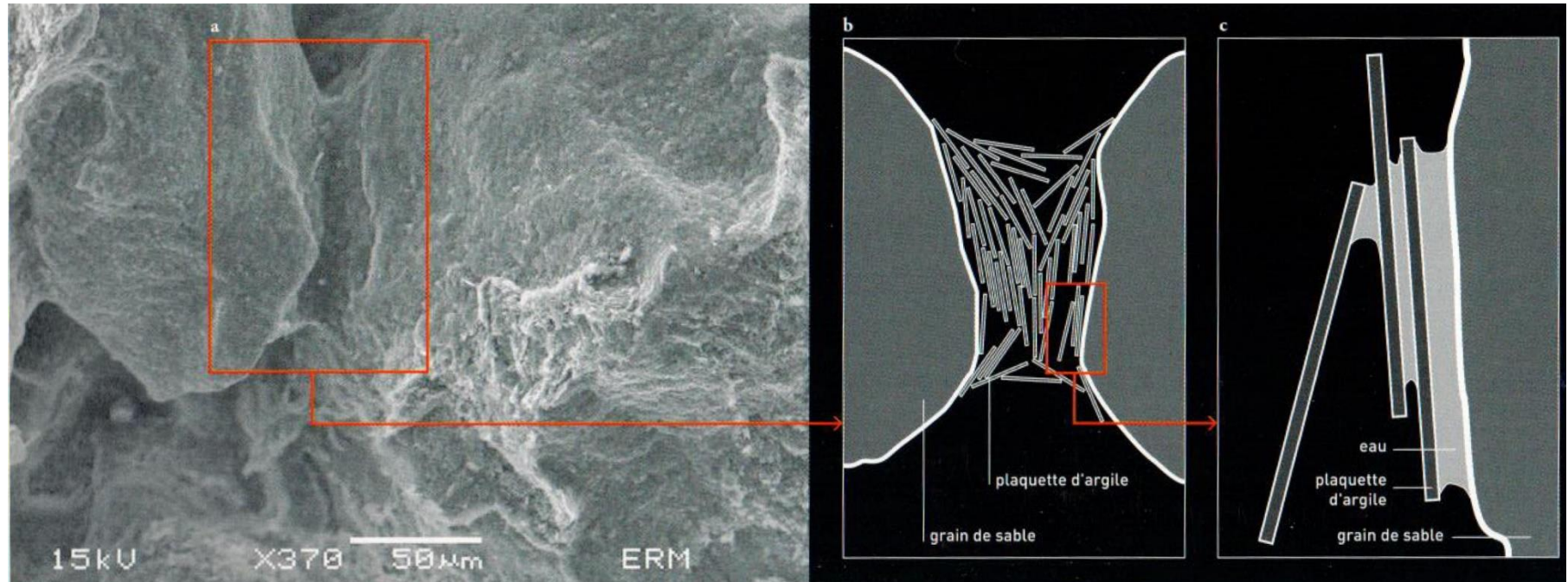
Liant = argile(s)

- ▶ Diversité de forme et de structure
- ▶ L'épaisseur du feuillet n'excède pas quelques atomes.
- ▶ principalement composés de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3).



Argile + eau + air = pont capillaire

- Propriétés de cohésion et de plasticité liés à l'eau



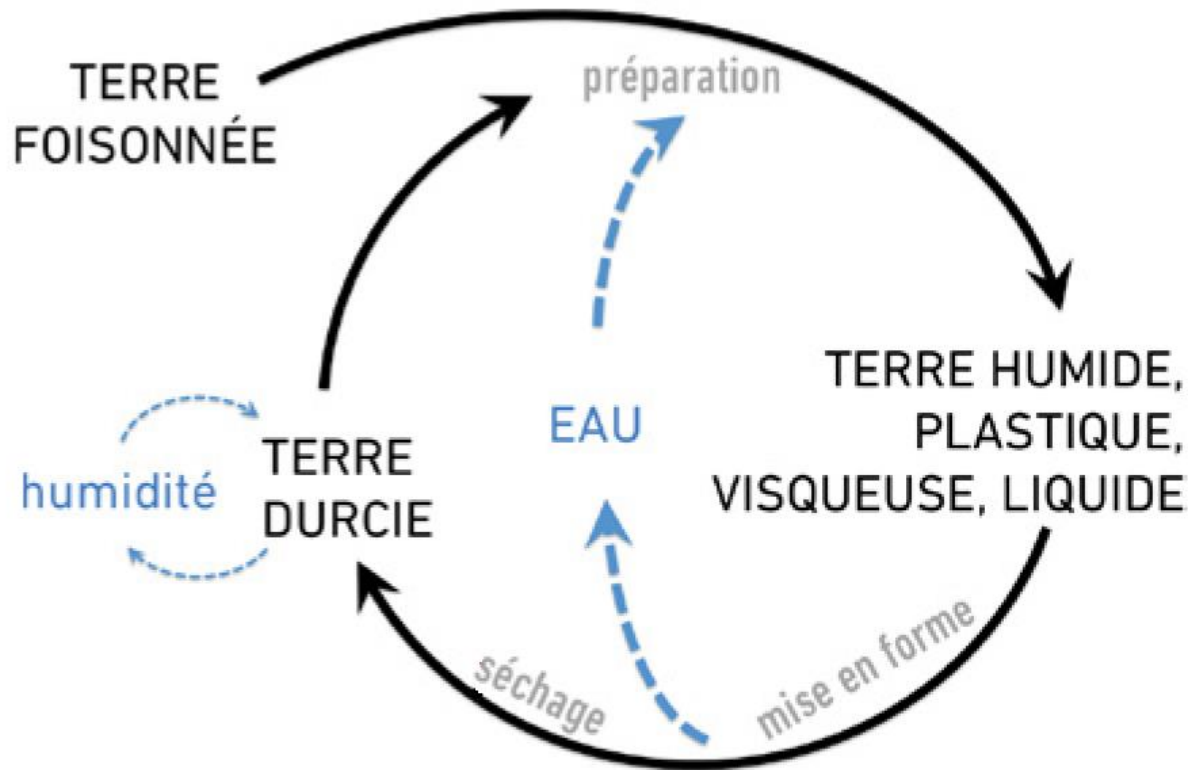
Pont capillaire ↔ interface eau-air

- Les forces capillaires exercent une force d'attraction très intenses
- Optimisation de la surface entre l'eau et l'air



Sécher pour durcir

- ▶ Présence simultanée d'eau et d'air = cohésion
- ▶ L'humidité de l'air suffit à assurer la cohésion des plaquettes

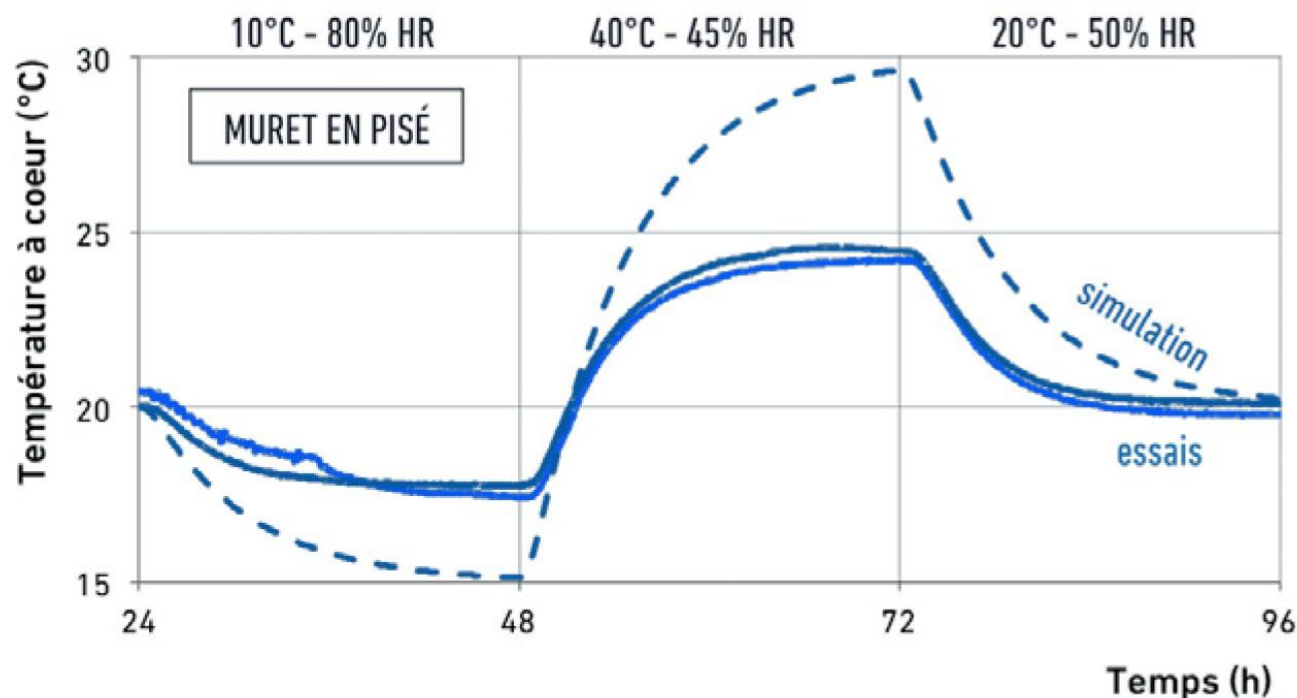


⇒ **Réversibilité de l'argile**



L'eau change d'état : elle s'évapore ou se condense en absorbant ou en libérant de l'énergie.

- ▶ Inertie thermique
- ▶ Matériau à changement de phase naturel



écart entre les mesures expérimentales de température au cœur du muret et la prévision obtenue par un modèle aux éléments finis.

En changeant de phase, la terre peut jouer un rôle dans la consommation énergétique des bâtiments.



Résistance à la compression

- Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de prédire la résistance à la compression d'une terre sans la mesurer expérimentalement
- Le lien entre la microstructure de la terre et ses propriétés mécaniques macroscopiques est extrêmement complexe



⇒ **Expérimentation**



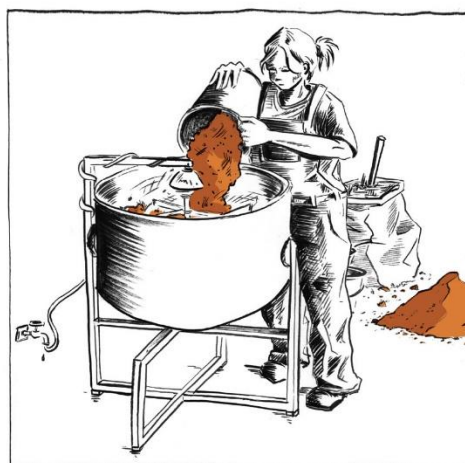
La terre non structurale : Les ENDUITS

- ▶ Les enduits en terre sont l'application la plus simple du matériau
- ▶ Semblable aux enduits de plâtre ou de ciment, car ils nécessitent les mêmes outils
- ▶ Le corps d'enduit est souvent en terre sableuse
- ▶ Addition de fibres végétales afin d'éviter les fissures.
- ▶ Produits préparés
- ▶ Pas de risque
- ▶ Image positive :
 - sans impact sur la santé ou l'environnement
 - pas d'allergies
 - bon régulateur de l'humidité ambiante





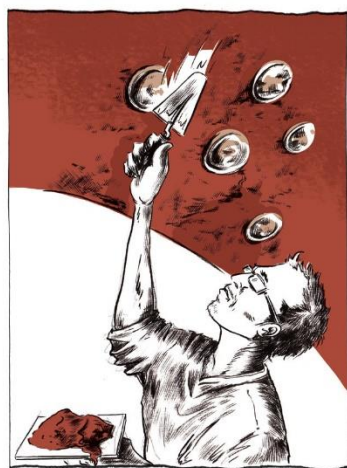
LA TERRE EST TAMIÉE POUR NE CONSERVER QUE LES ARGILES, LES SILTS ET LES SABLES.



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



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



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.



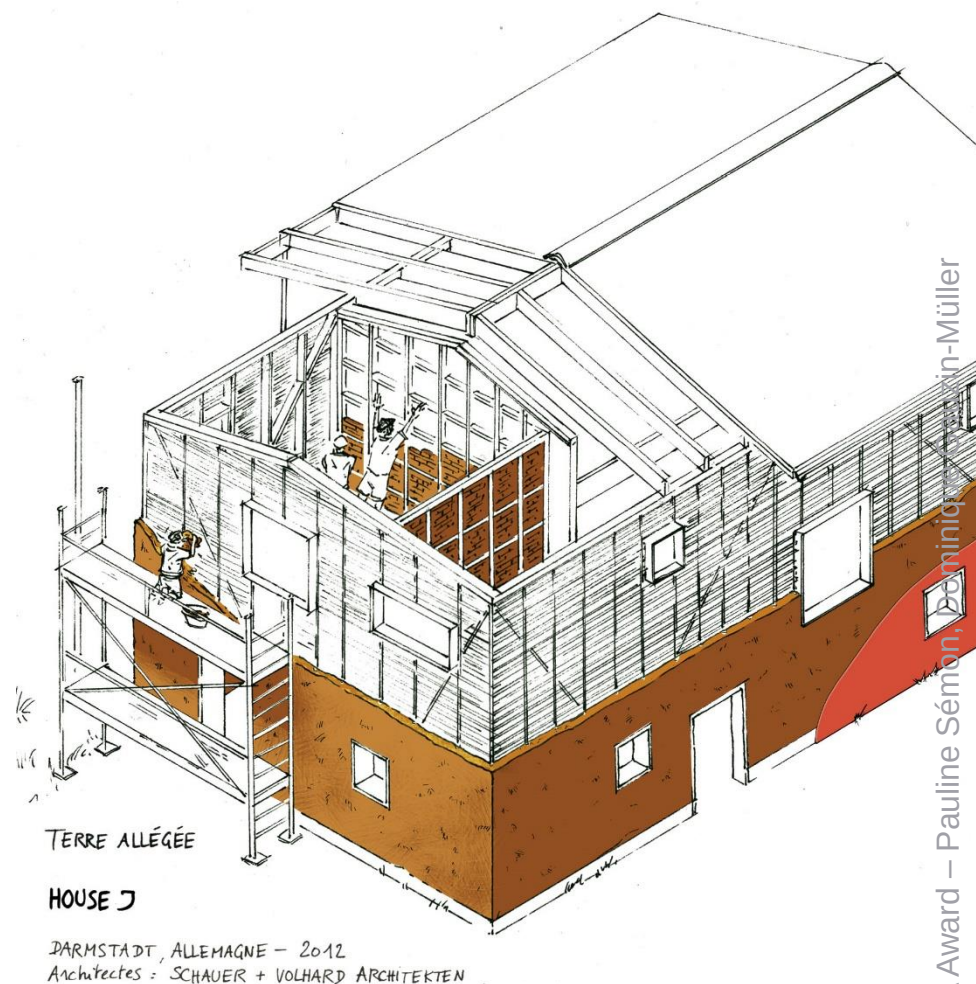
LA DERNIÈRE COUCHE EST TRÈS FINE. ICI, LE MÉLANGE D'ARGILE, SABLE FIN ET CIRE A ÉTÉ APPLIQUÉ À LA TRUELLE ET POLI POUR OBTENIR UNE FINITION BRILLANTE.

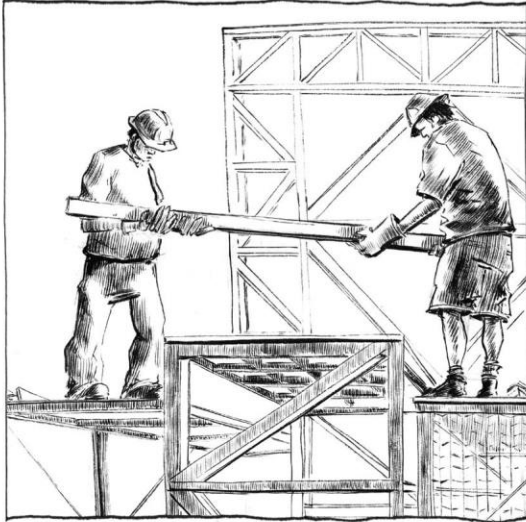


L'ENDUIT DE FINITION PEUT AUSSI ÊTRE MIS EN ŒUVRE À LA MAIN.

La terre non structurale : le TORCHIS et terre allégée

- ▶ 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
- ▶ L'allemand Franz Volhard a développé un principe de « terre allégée » à base de paille mélangée à une barbotine argileuse





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, AMENDÉ ICI AVEC DE LA PAILLE.



LE MÉLANGE EST PLAQUÉ À LA MAIN SUR LA STRUCTURE, ICI EN MAILLE D'ACIER.



LA TERRE EST L'ISSÉE À LA MAIN.



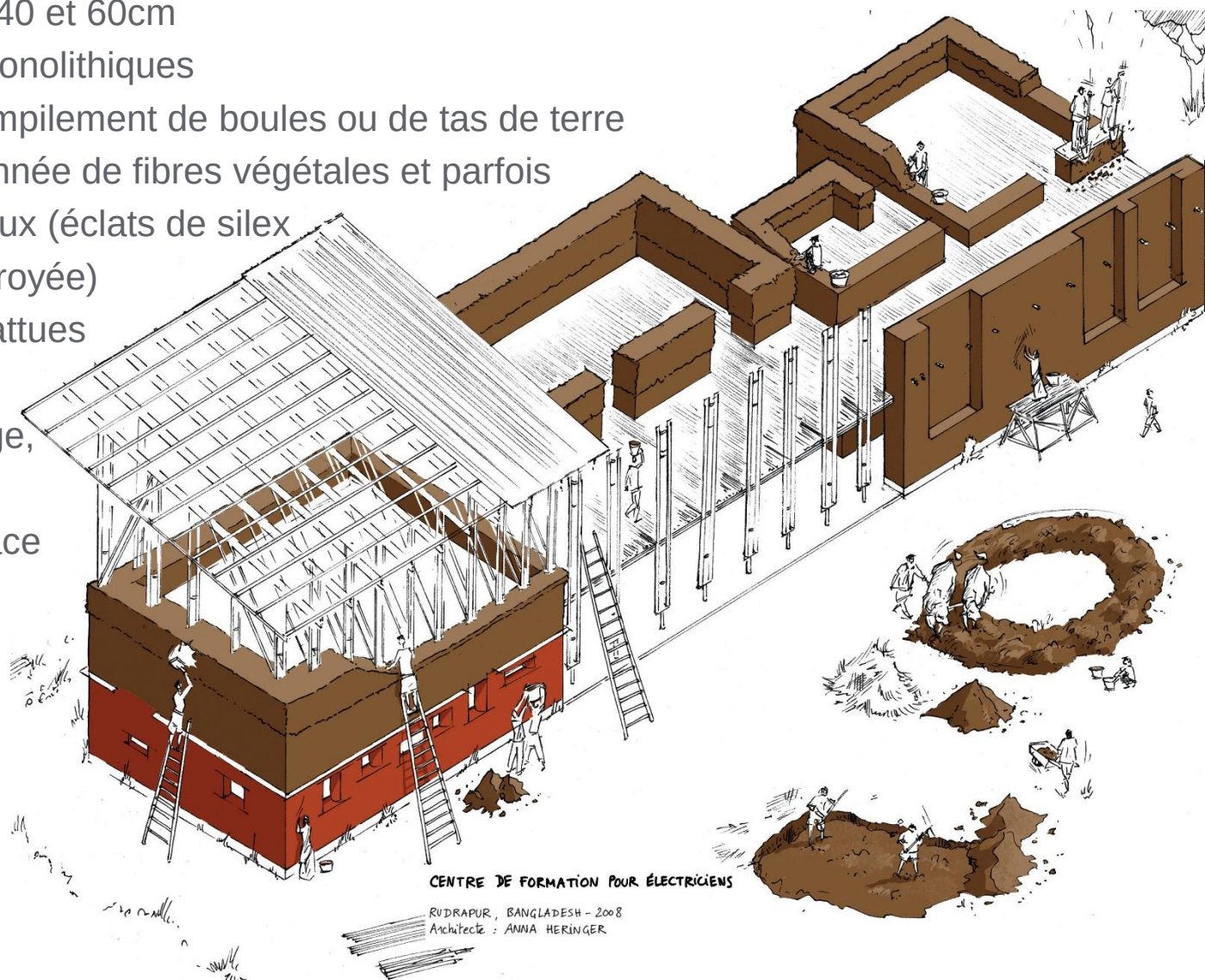
LA PLANÉITÉ EST VÉRIFIÉE À L'AIDE D'UNE GRANDE RÈGLE MÉTALLIQUE.



UN ENDUIT EN TERRE, PARFOIS STABILISÉ À LA CHAUX AÉRIENNE, EST APPLIQUÉ LORSQUE LE MUR EST SEC.

La terre comme élément porteur : la BAUGE

- ▶ épaisseur entre 40 et 60cm
- ▶ murs massifs, monolithiques
- ▶ constitué d'un empilement de boules ou de tas de terre
- ▶ mélange additionnée de fibres végétales et parfois d'éléments minéraux (éclats de silex ou de terre cuite broyée)
- ▶ les faces sont battues pour éviter les fissures au séchage, puis taillées afin d'obtenir une surface plane



MATÉRIAU



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



LE MÉLANGE EST ENVOYÉ DIRECTEMENT SOUS 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 SOUBASSEMENT PAR COUCHES D'ENVIRON 50 À 60 CM DE HAUTEUR. ELLES SONT SOUVENT JETÉES LES UNES SUR LES AUTRES POUR UNE MEILLEURE COHÉSION.



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

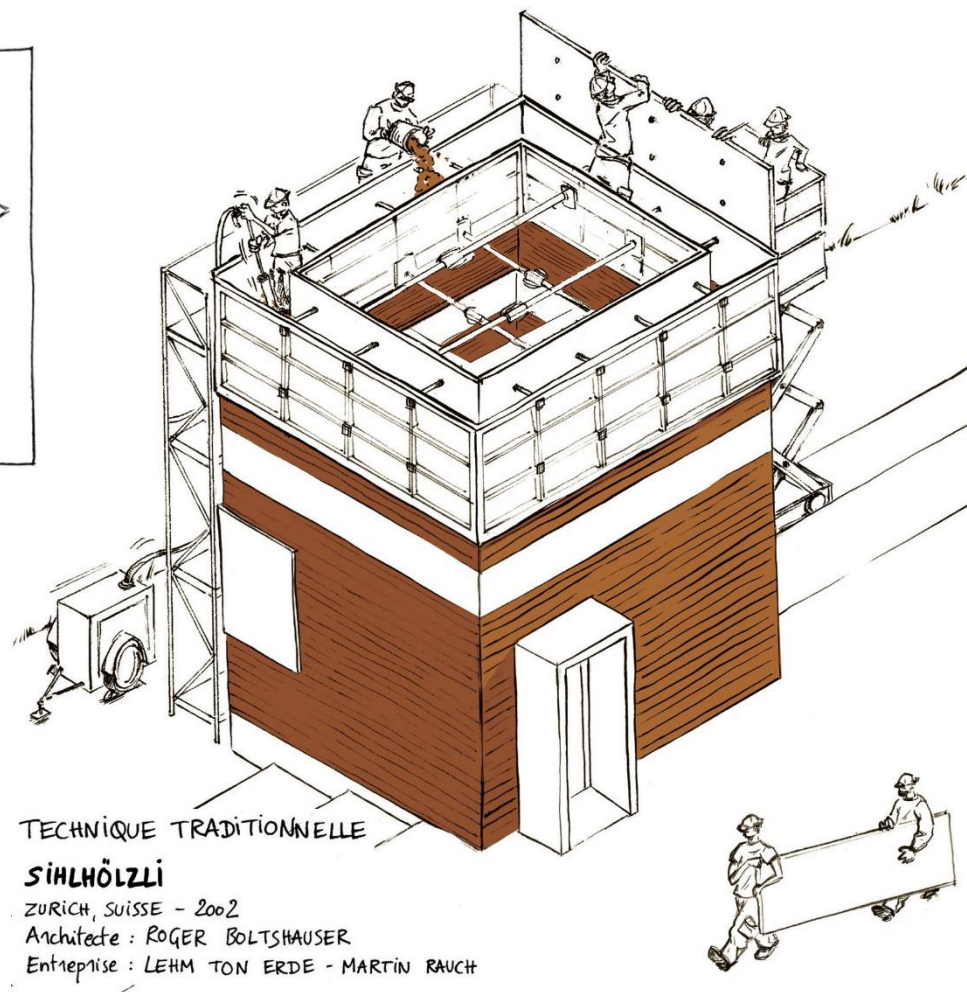
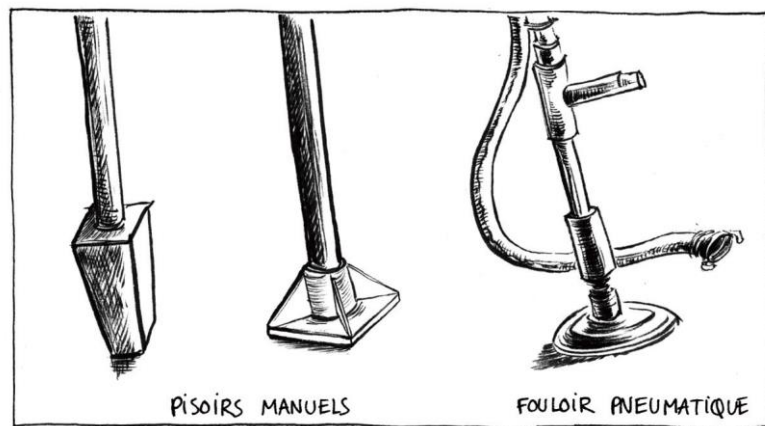
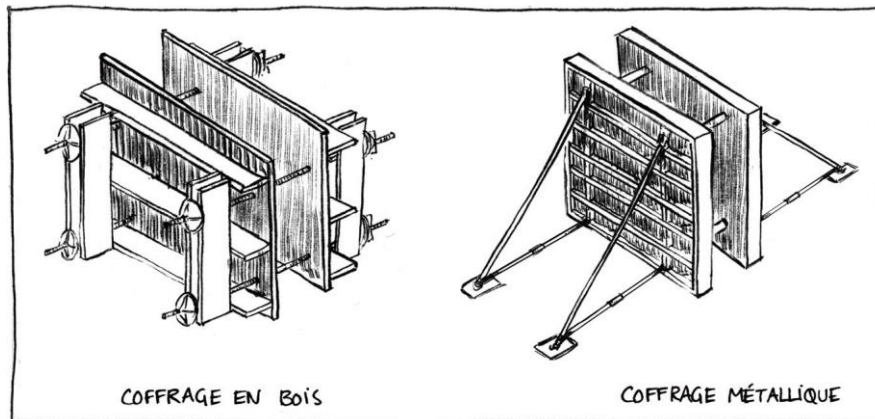


LES DEUX FACES DU MUR SONT TAILLÉES À L'AIDE D'UNE BÈCHE OU D'UN OUTIL TRANCHANT.



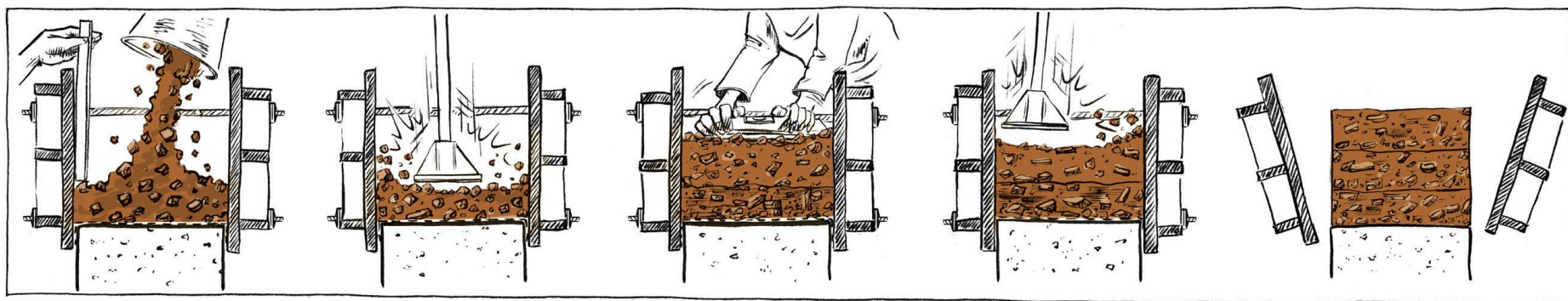
LE MUR EST DÉBARRASSÉ DES BOUTS DE PAILLES QUI DÉPASSENT AFIN DE PRÉPARER UNE PAROI PLANE. SI LA SURFACE DOIT ÊTRE ENDUITE, ELLE EST PRÉPARÉE PAR SCARIFICATION OU GRATTAGE POUR PERMETTRE UN BON ACCROCHAGE.

La terre comme élément porteur : le PISÉ



La terre comme élément porteur : le PISÉ

- ▶ murs massifs, monolithiques
- ▶ fines couches damées entre des banches
- ▶ Mélange (gros graviers) à peine humide
- ▶ décoffrage immédiat
- ▶ les strates compactées restent visibles
- ▶ possible stabilisation avec du ciment ou de la chaux



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.

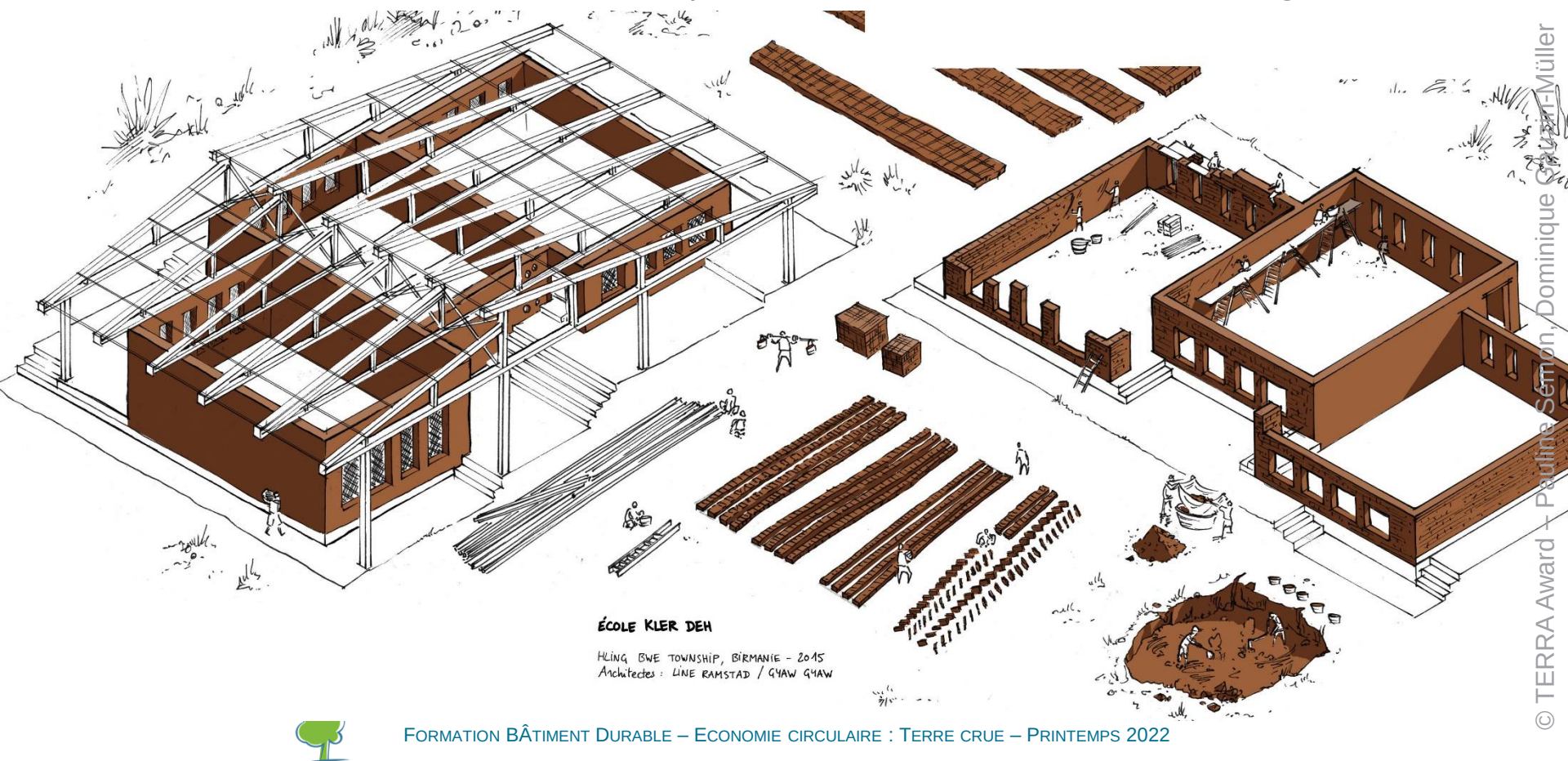
CHAQUE NOUVELLE COUCHE EST À SON TOUR COMPACTÉE.

LE MUR, GÉNÉRALEMENT ÉPAIS DE 40 À 60 CM, PEUT ÊTRE DÉCOFFRÉ IMMÉDIATEMENT.



La terre comme élément porteur : l'ADOBE

- ▶ brique de terre crue façonnée à la main ou moulée
- ▶ séchée pendant quelques jours à l'air libre ou sur des aires couvertes
- ▶ Mélange à l'état plastique
- ▶ Souvent additionné de fibres pour réduire les fissures lors du séchage

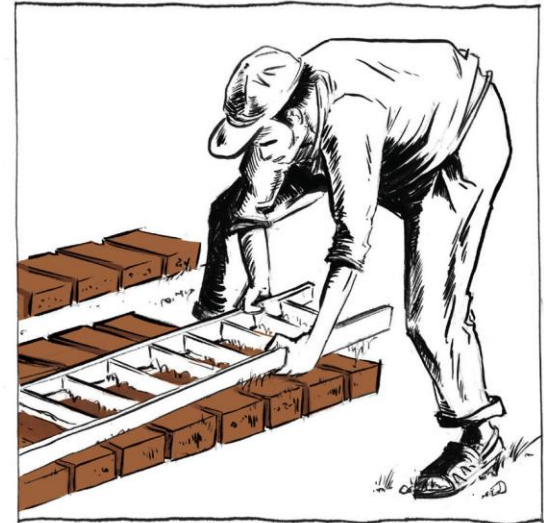




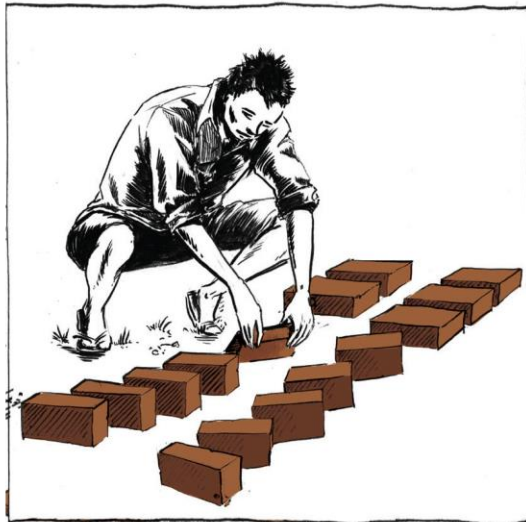
LA TERRE EST MALAXÉE JUSQU'À ATTEINDRE L'ÉTAT PLASTIQUE (15 À 30 % D'EAU).



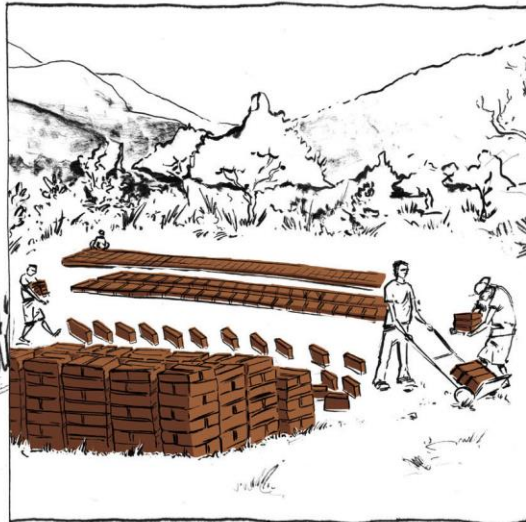
UN MOULE EN BOIS AVEC UNE OU PLUSIEURS ALVÉOLES EST REMPLI AVEC LE MÉLANGE.



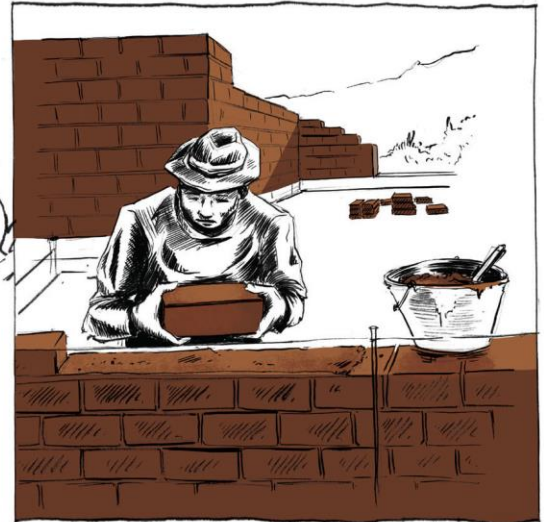
LES BRIQUES SONT DÉMOULÉES ET LAISSÉES À SÉCHER SUR DE VASTES SURFACES.



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



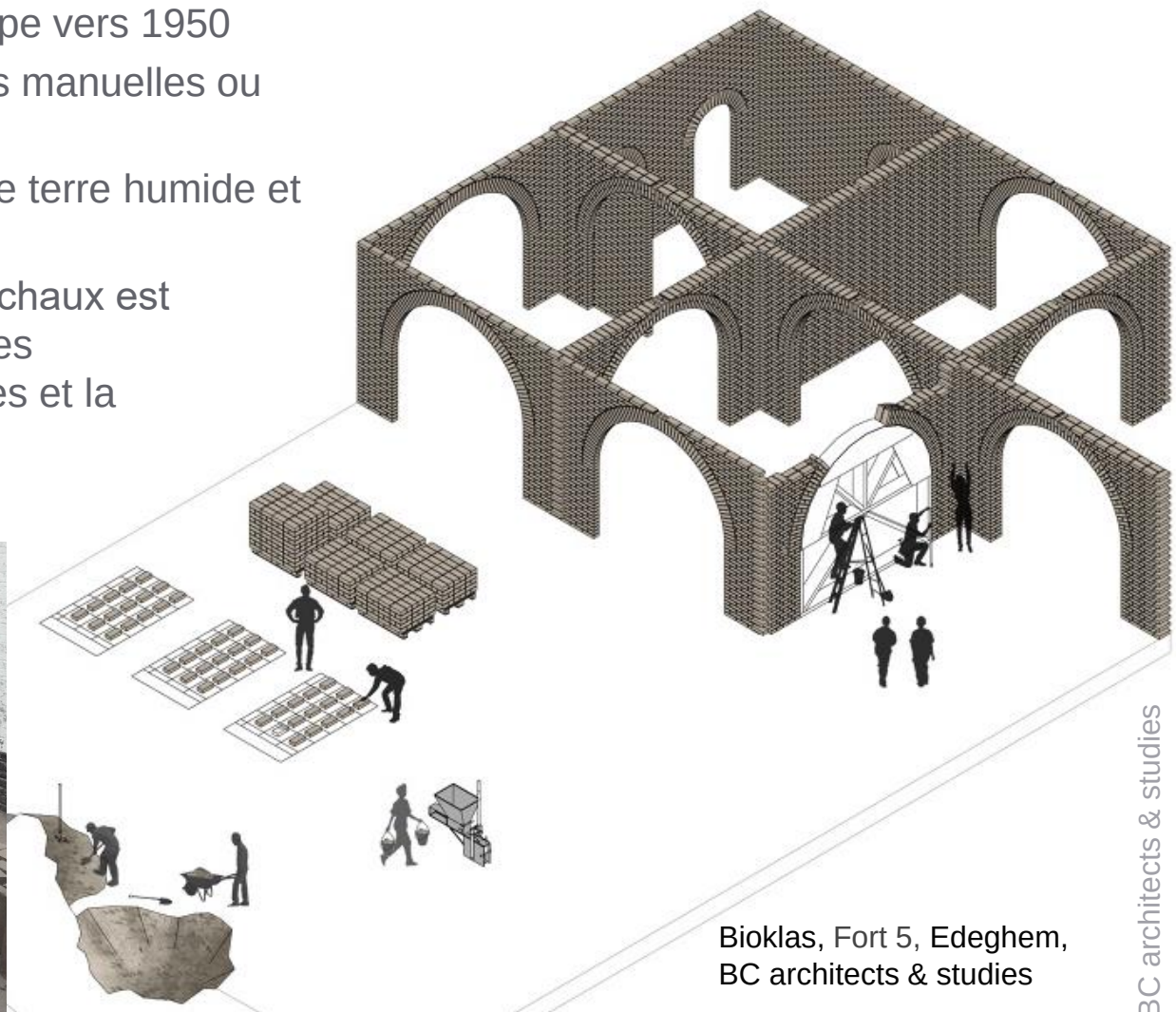
UNE FOIS SÈCHES, LES BRIQUES SONT EMPILÉES ET STOCKÉES.



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

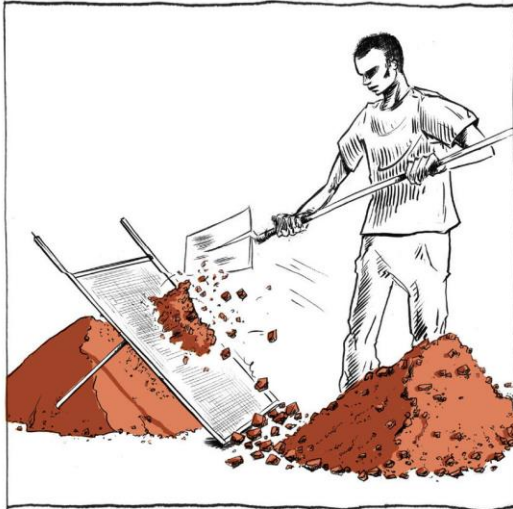
La terre comme élément porteur : la BTC = Brique de Terre Comprimée

- ▶ cette technique se développe vers 1950
- ▶ fabriqués dans des presses manuelles ou mécanisées
- ▶ Mélange (petits graviers) de terre humide et pulvérulente
- ▶ L'addition de ciment ou de chaux est courante pour augmenter les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'eau

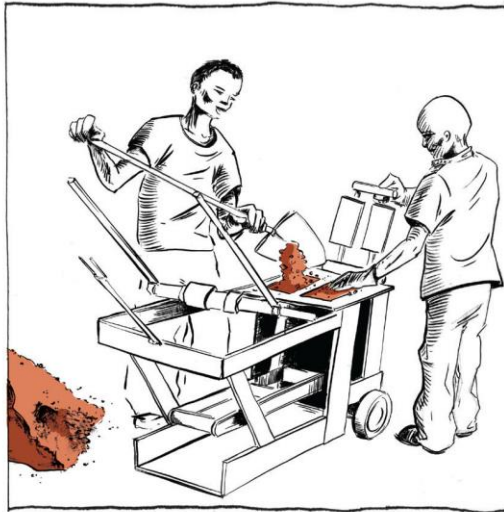


Bioklas, Fort 5, Edegheem,
BC architects & studies

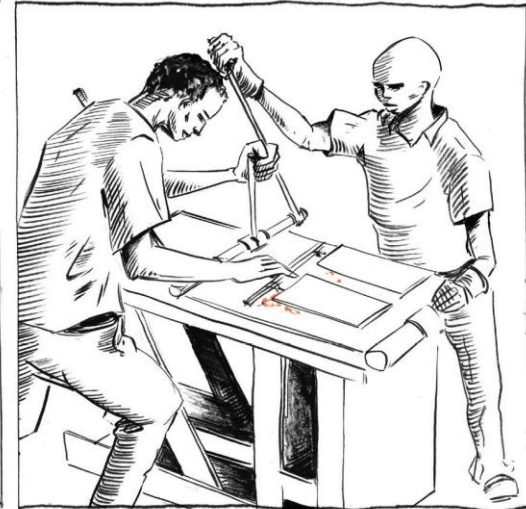




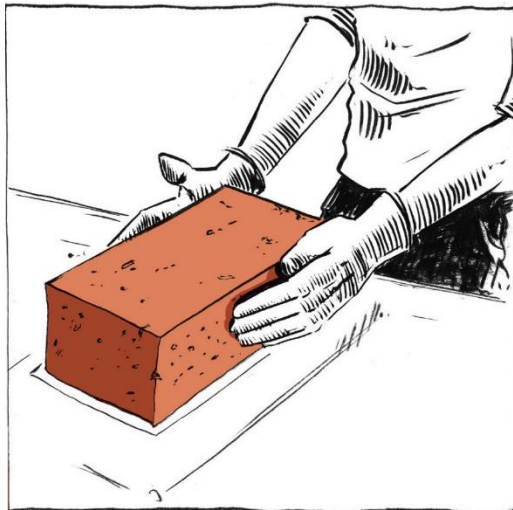
LORS DE SA PRÉPARATION, LA TERRE EST BROYÉE ET TAMISÉE POUR OBTENIR UN MATÉRIAU PULVÉRENT, HUMIDE ET HOMOGÈNE.



LE MÉLANGE EST PLACÉ DANS LE MOULE DE LA PRESSE.



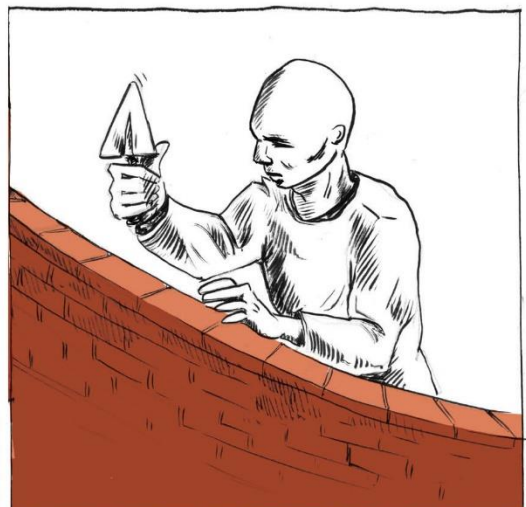
LA TERRE EST COMPRIMÉE MANUELLEMENT.



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.

La terre comme élément porteur : la BÉTON D'ARGILE coulé sur place

- ▶ Le cousin germain du béton
- ▶ Les connaissances, les savoir-faire, les technologies industrielles, les technologies de chantier et les innovations sont transférables à la terre.
- ▶ Stabilisation par un liant hydraulique pour garantir le décoffrage dans un temps raisonnable : entre 4 et 8% de chaux ou de ciment – 15% pour le béton
- ▶ R&D : bétons d'argile auto-durcissants sans ciment. Ajout d'un agent coagulant ayant une action différée dans le temps

1 - extraction



2 - préparation

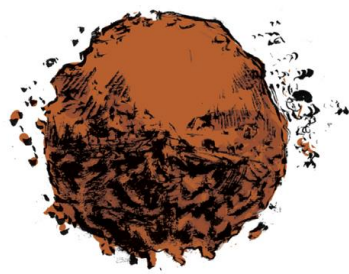




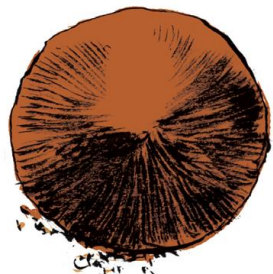


Quelle terre pour construire ?

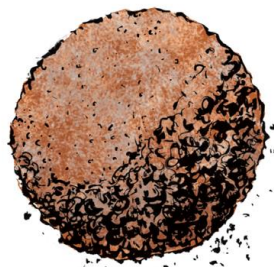
- ▶ Il faut envisager la possibilité de reformuler le mélange
- ▶ Il faut investir dans les études pluridisciplinaires préalables pour
 - Trouver la matière première à proximité du site de construction
 - Déterminer les amendements



des argiles
 $< 2\mu\text{m}$



des silts
 $60\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$



des sables
 2mm à $60\mu\text{m}$



des graviers
 2cm à 2mm



des cailloux
 20cm à 2cm

⇒ **Le SOURCING = essor de la terre crue**



FRANÇOIS COINTEREAUX : UNE LEÇON D'HISTOIRE

MATÉRIAU

SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE

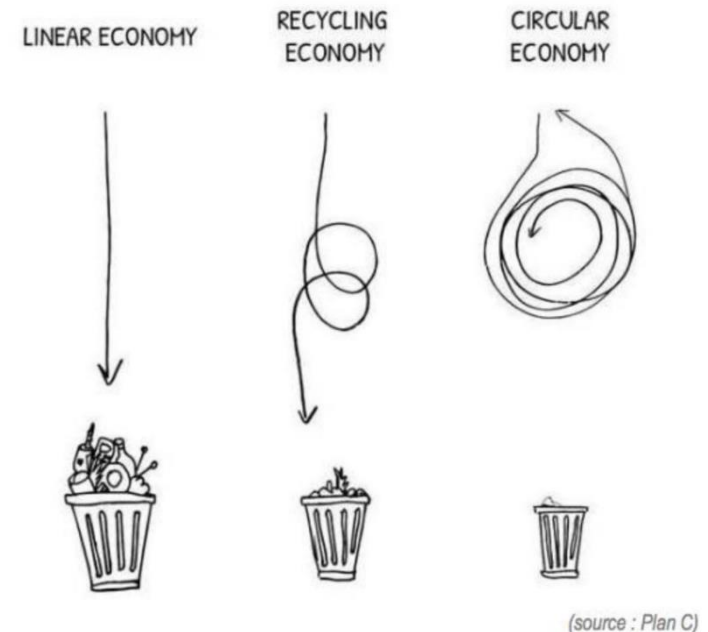
- ▶ Bon sens
- ▶ Descente de charges
- ▶ Détails techniques

OBSTACLES POUR LE DÉVELOPPEMENT



Simplicité constructive + circularité + bon sens

- ▶ **Savoir-faire et matériaux : locaux ou régionaux**
- ▶ **Mode de construction non spécialisés**
- ▶ **Minimiser les exploits structurels**
- ▶ Réponse efficace aux contraintes techniques et environnementales
- ▶ Privilégier le low-tech (juste dosage technologique pour un entretien simple)
- ▶ Lisibilité des méthodes constructives (porteur ⇔ finition) pour faciliter les transformations
- ▶ Faciliter la réutilisation des matériaux (outils standardisés)
- ▶ Réduire le besoin de rénovation



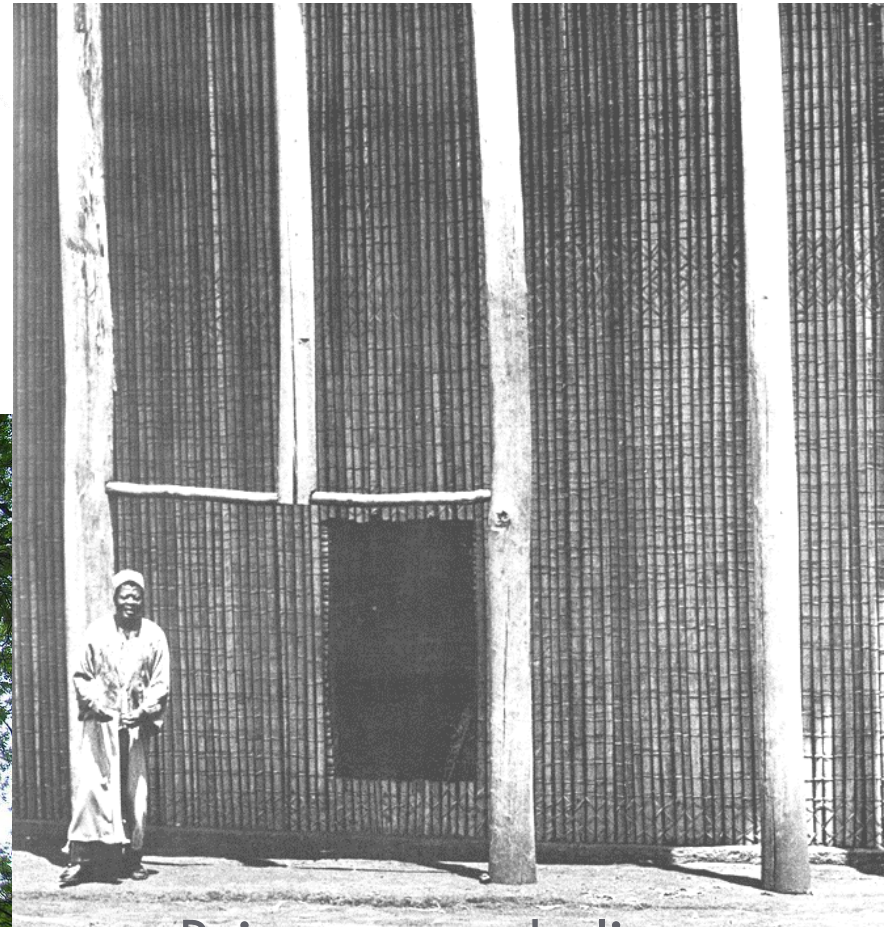
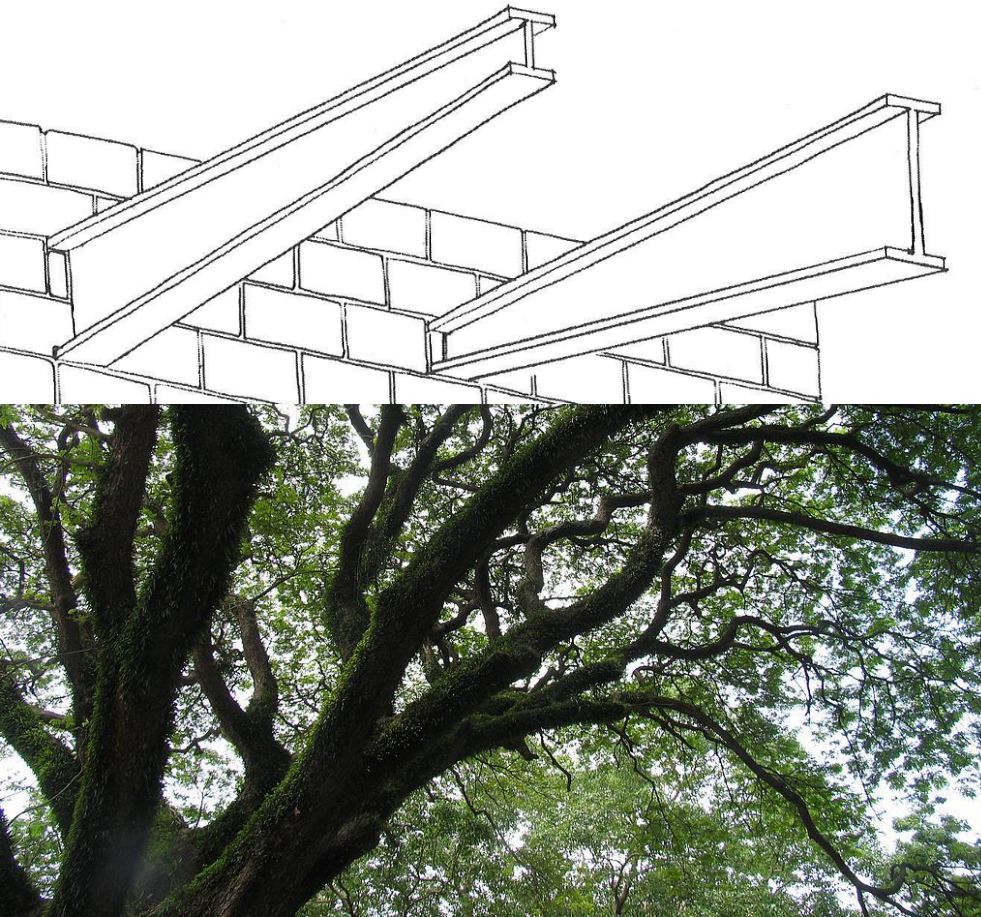
⇒ **Coûts et risques** ↘

⇒ **Durabilité et résilience** ↗



Le bon sens

- compréhension intuitive

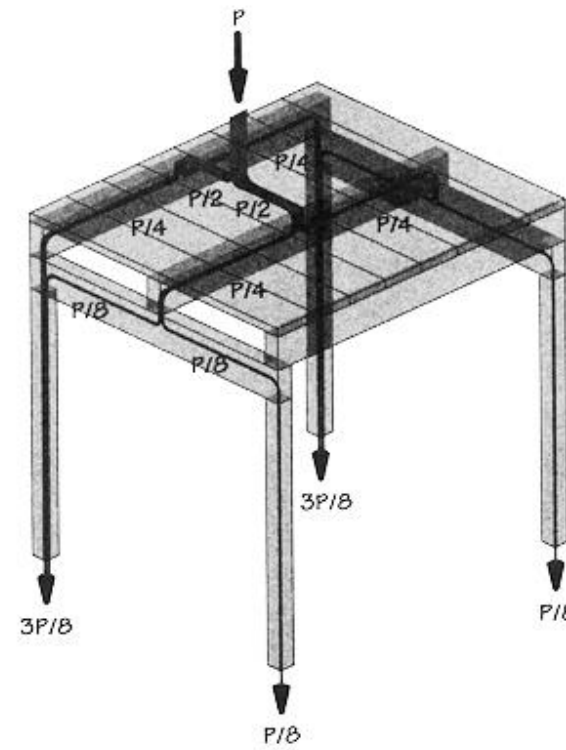
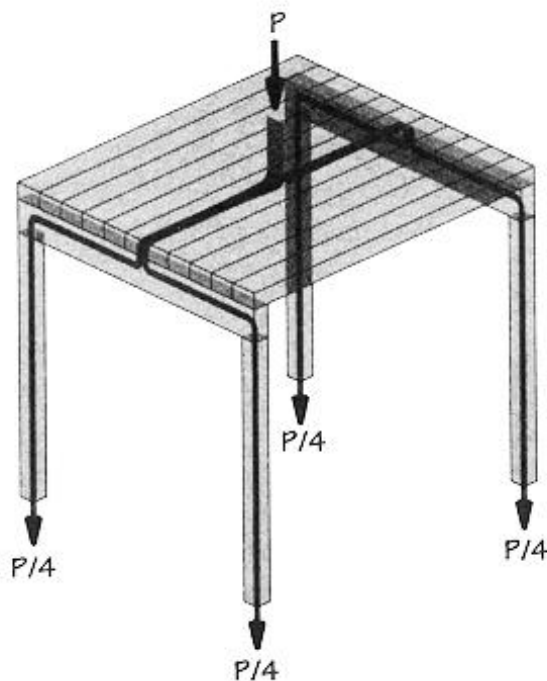


Puissance symbolique



La descente de charges

- ▶ Toute structure transfère ses charges sollicitantes vers ses appuis
- ▶ On s'intéresse au chemin des forces dans le bâtiment jusqu'aux fondations

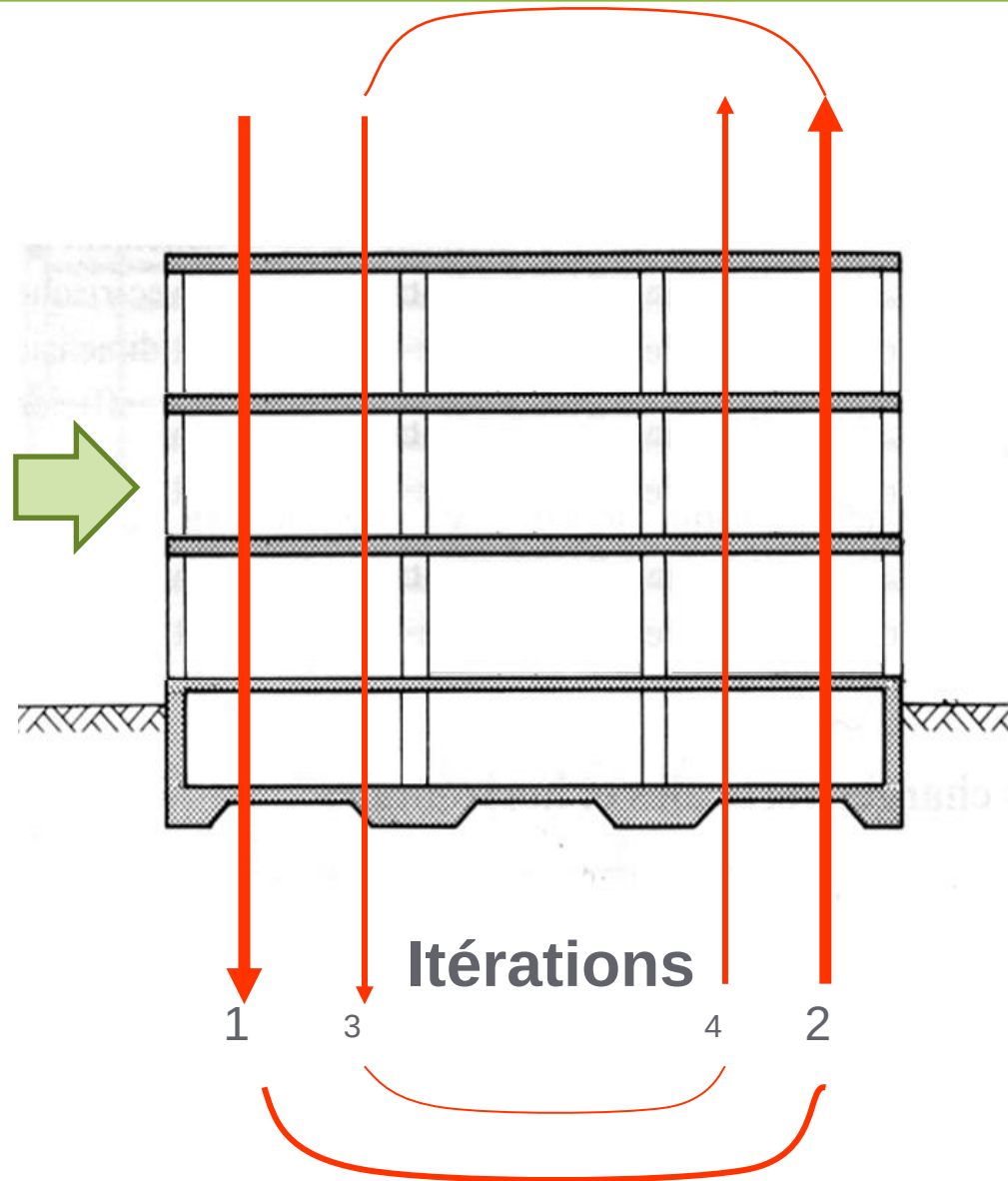


⇒ C'est aussi simple que ça



Les sollicitations verticales (gravité)

- Analyse étage par étage jusqu'aux fondations
 - Sens de portée, matérialité et dimension des éléments porteurs
1. Toutes les questions doivent être identifiées mais pas nécessairement résolues pour passer à l'étage suivant
 2. On valide ou non les hypothèses émises en faisant le chemin inverse
 - 3 et + Et on recommence avec plus de précision ...



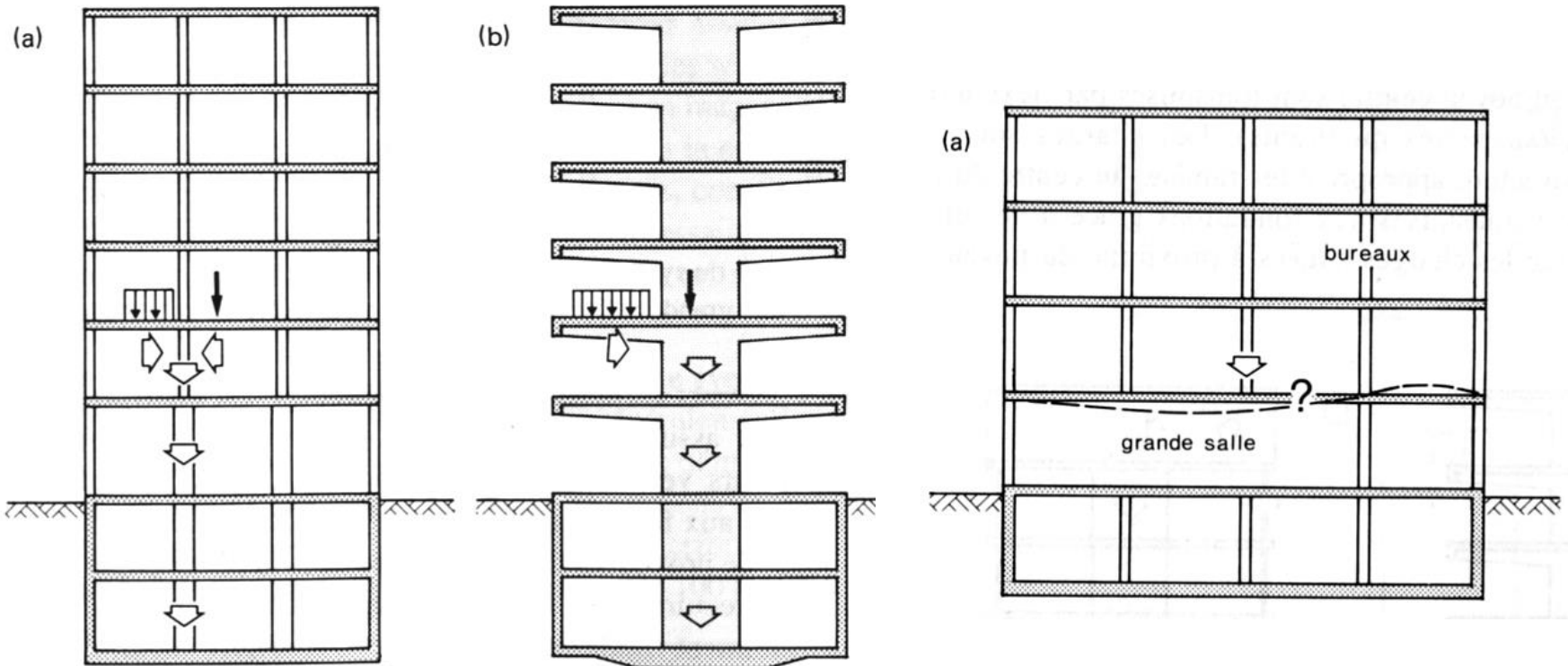
Les sollicitations horizontales (vent, ...)

⇒ Un outil très puissant



Dans vos projets

- ▶ Ne laissez pas ces questions en suspend
- ▶ Eviter les points singuliers



Quelques exemples de structures remarquables



Coussée & Goris

Boerekreek à Sint Laureins – 2008

- ▶ Questions de géométrie spatiale (le plan rencontre la coupe), la lumière
- ▶ Treillis en bois évolutif



Rem Koolhaas

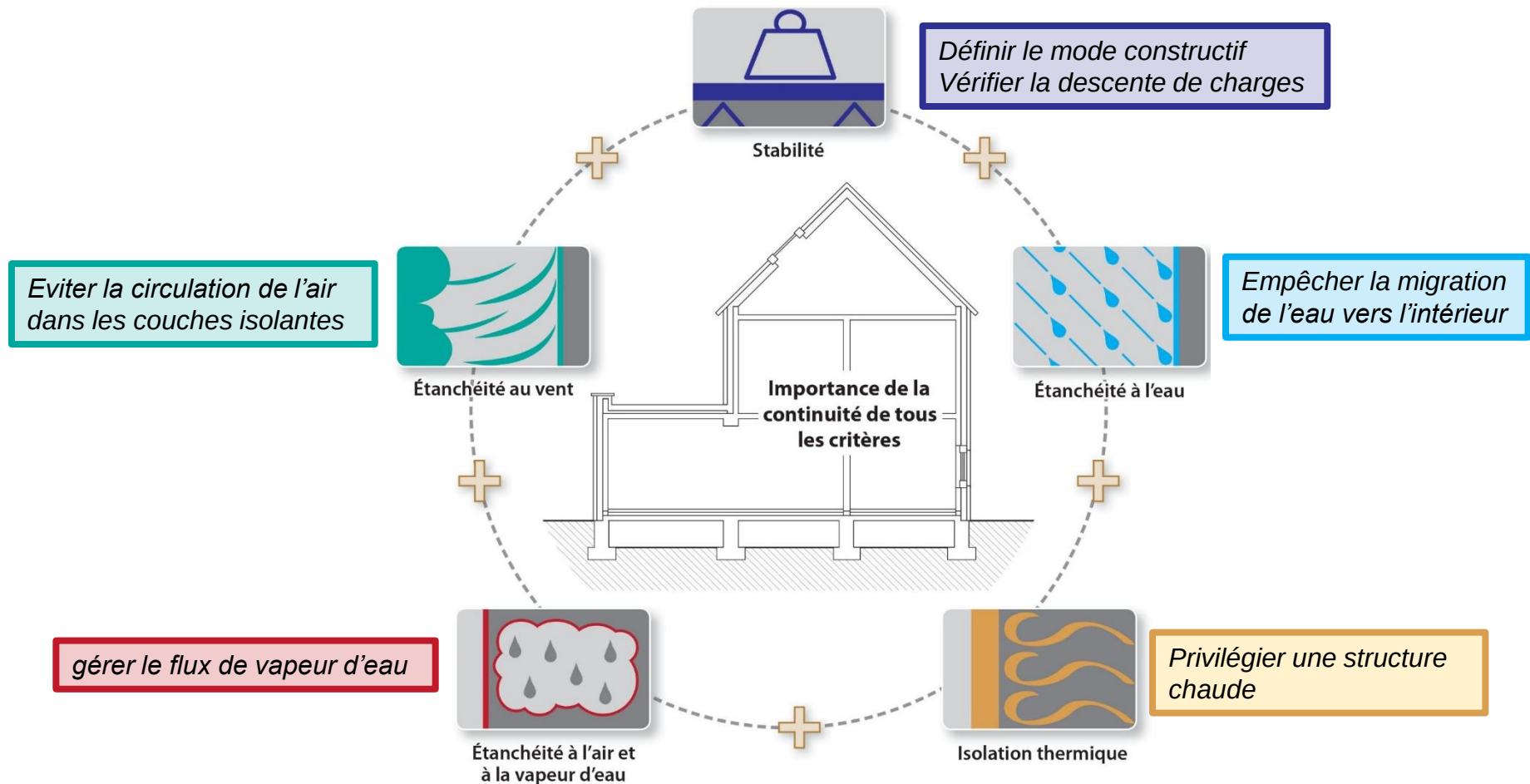
Maison Lemoine à Floirac – 1998

- ▶ Boite en lévitation, mise en scène, dramaturgie des appuis
- ▶ Portique, poutre inversée avec porte-à-faux et contre poids, voile béton et percements



Le détail technique

- Analyser les nœuds constructifs permet d'y voir plus clair



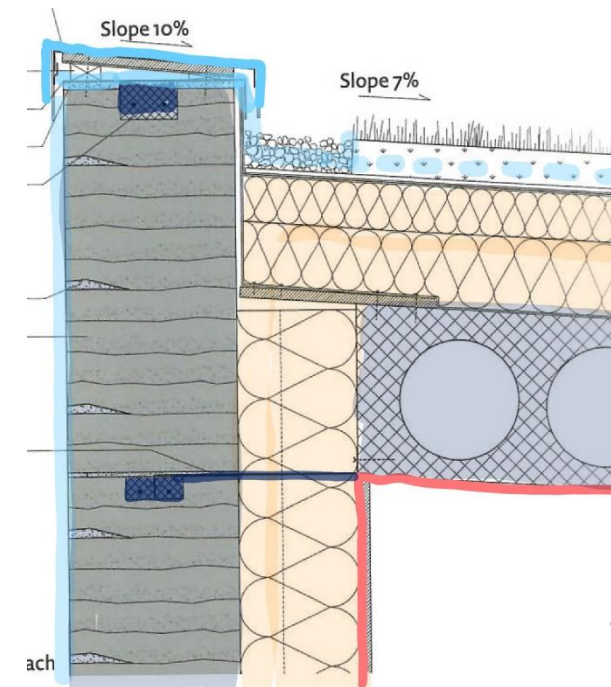
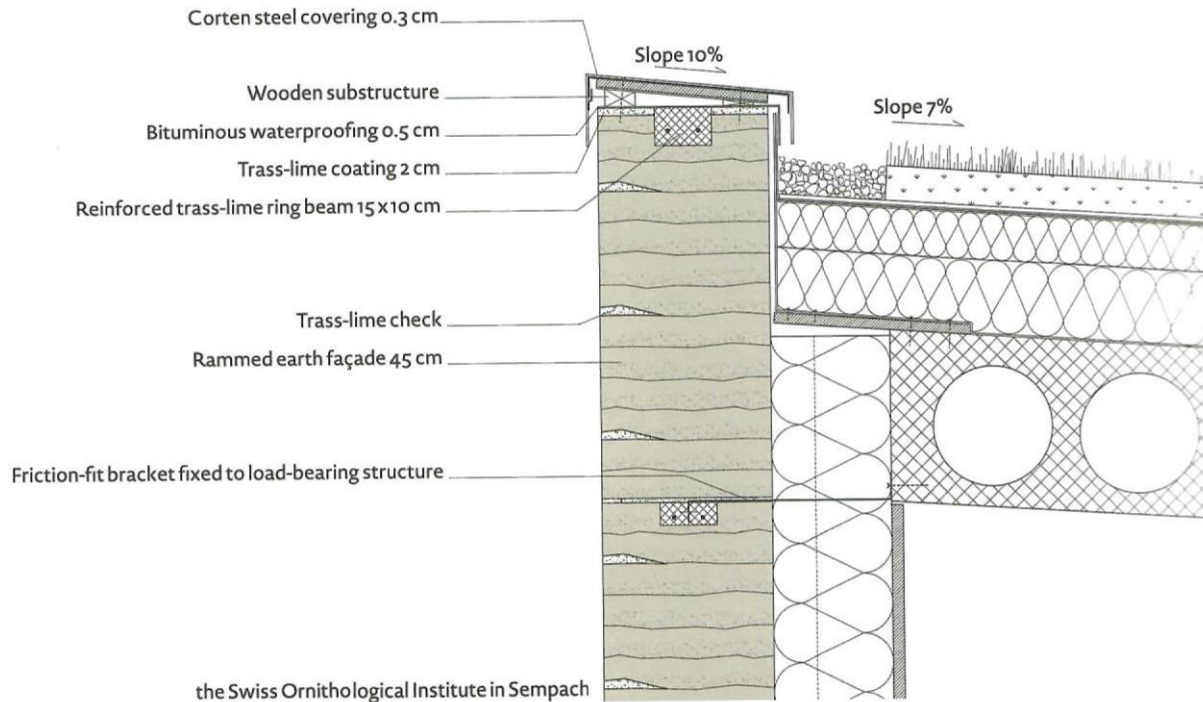
L'institut ornithologique suisse

1 - méthode constructive / descente de charges

2 - étanchéité extérieure (eau et vent)

3 - isolation thermique

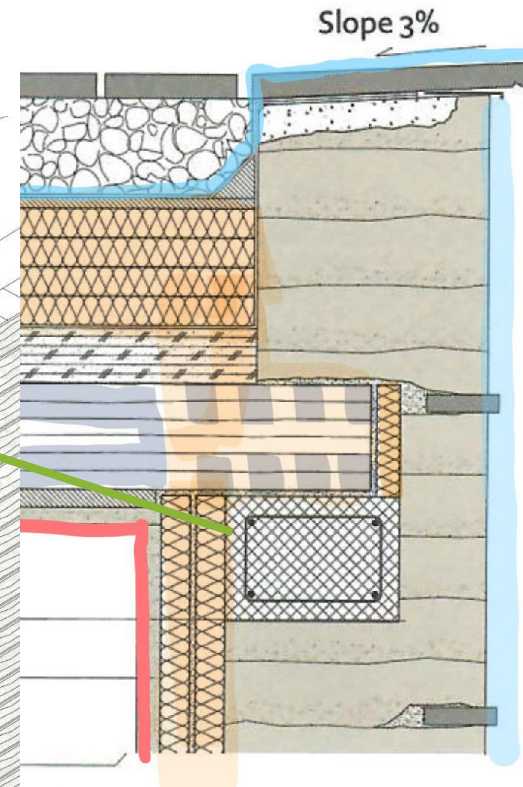
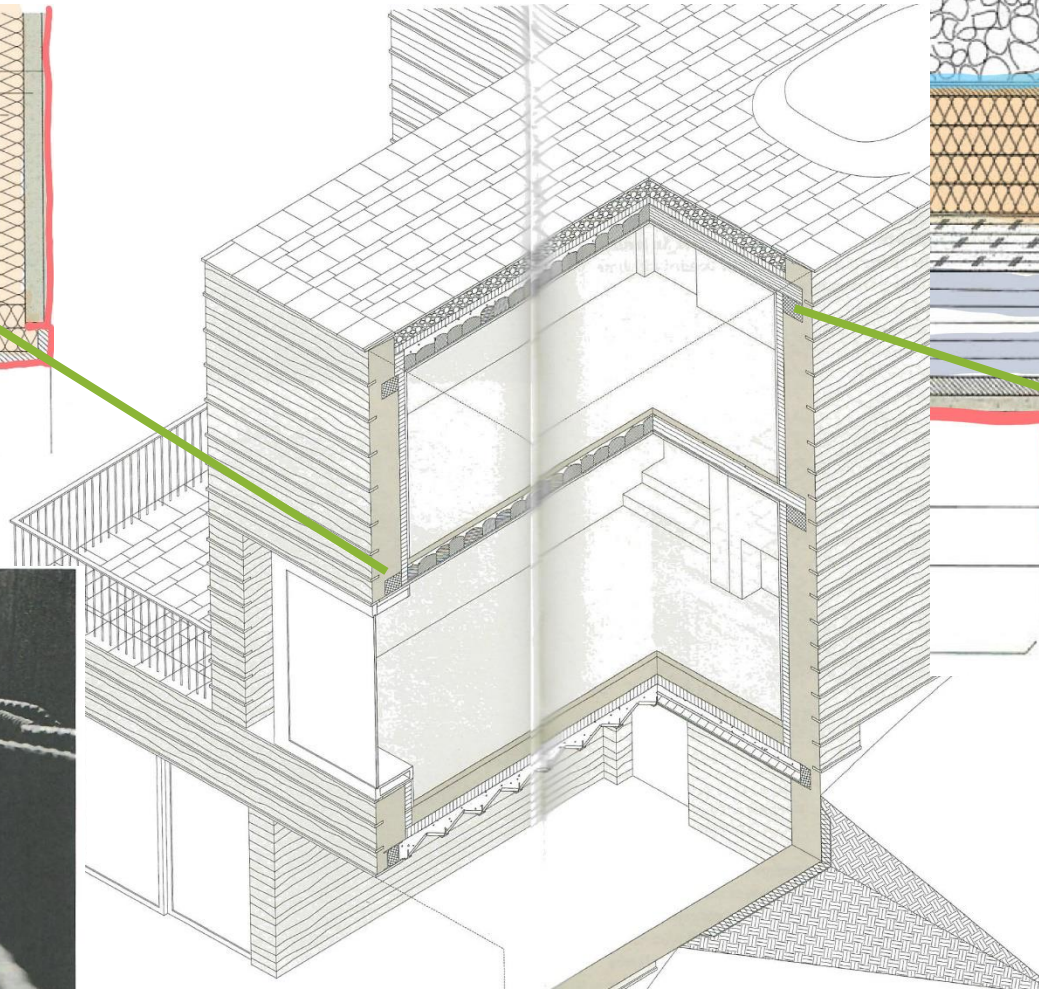
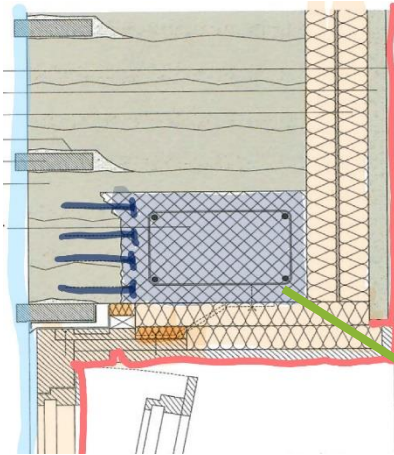
4 - étanchéité intérieure (air et vapeur d'eau)



Sempach, Suisse, 2015
:mlzd



Rauch House



Schlins, Autriche, 2005 – 2008
Roger Boltshauser / Martin Rauch



FRANÇOIS COINTEREAUX : UNE LEÇON D'HISTOIRE
MATÉRIAU

SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE

OBSTACLES POUR LE DÉVELOPPEMENT

- ▶ **Normes et assurances**
- ▶ **Economie**
- ▶ **Industrie**



Normes et assurances

- ▶ cadre normatif
- ▶ outils de contrôle qualité sur chantier
- ▶ méthodes reconnues de calculs des structures
- ▶ référentiels techniques
- ▶ vulgarisations scientifiques
- ▶ réglementation thermique adaptée



Faire évoluer les normes

 Les protocoles d'essai doivent être adaptés au matériau.

⇒ **OPEN SOURCE** : une option à envisager



Economie

- ▶ marché de niche
- ▶ petits marchés
- ▶ marchés publics inadaptés
- ▶ limite du système associatif
- ▶ surcoût lié à l'absence de logique constructive établie
- ▶ Formation et réseau de compétences : peu de praticiens
 - trouver des entreprises qualifiées.
 - peu de débouchés pour les apprentis



Le terre, un matériau haut de gamme

- ▶ Béton coulé massif 20cm = 170 €/m²
- ▶ Terre coulée 35cm = 300 €/m²
- ▶ Pisé 40cm = 600 - 800 €/m²

(magazine d'architectures n°278)

(magazine d'architectures n°285)



Comparaison de prix

- construire en terre, U. Röhlen, Ch. Ziegert, éd. Le moniteur

Tableau 11.2. Comparaison des coûts des éléments de construction

Construction terre		Solution 1	Solution 2 (simple)
<i>Enduits, revêtements, peintures</i>			
1	Enduit terre, 2 couches + primaire + 2 couches de badigeon argile 32,50 à 37,00 €/m²	Enduit chaux naturelle, 2 couches + 2 couches de badigeon chaux 30,50 à 32,50 €/m²	Enduit plâtre, monocouche + préprojection ou primaire + papier peint ingrain + 2 couches de peinture en dispersion 20,50 à 24,50 €/m²
<i>Pisé</i>			
15	Mur en pisé apparent 30 cm 300,00 à 900,00 €/m²	Mur en pierres naturelles apparentes 30 cm 300,00 €/m² Maçonnerie en briques de terre apparentes 36,5 cm 135,00 à 155,00 €/m²	Mur en béton apparent 30 cm qualité simple 130,00 à 150,00 €/m²
16	Sol en pisé 10 à 15 cm surface cirée + pose d'un géotextile 150,00 €/m²		Chape de ciment 6 à 8 cm surface cirée 45,00 €/m²

Conditions : tarifs 2010 HT, réalistes à partir de 100 m² environ, basés sur un coût de main d'œuvre de 40 € par heure. Tarifs fixés pour les surfaces de mur. Majoration de 15 à 20 % pour les plafonds. Légère réduction de coût possible avec d'autres types de peinture (environ 2 €).

Enduit terre : sous-couche en mortier terre grossier → 13 à 17 min

Application d'une couche de mortier terre sur les murs/plafonds comme sous-couche. Préparation du support dans les règles de l'art comprise (éventuellement balayer, humidifier). Niveau de qualité de surface Q2 (feutré), prêt à recevoir la couche suivante d'enduit terre de 3 à 5 mm d'épaisseur. Épaisseur : 15 mm.

Enduit terre : enduit de finition ou enduit simple couche en mortier terre grossier → 14 à 19 min

Application d'une couche d'enduit sur les murs/plafonds comme enduit de finition ou enduit simple couche. Préparation du support dans les règles de l'art comprise (éventuellement balayer, humidifier). Niveau de qualité de surface Q3 (taloché), prêt à peindre. Épaisseur de l'enduit : 10 mm.

Pisé : mur en pisé avec surface apparente → 350 à 1250 min

Construction d'un coffrage ferme, plan et rigide (résistant à une charge de 60 kN/m²). Contrôle de la consistance et de l'homogénéité de la terre à pisé. Remplissage du mélange à pisé en couches de 10 à 15 cm d'épaisseur. Compactage soigneux, uniforme, réalisé en plusieurs passes manuellement ou avec une machine. Réalisation structurellement stable, avec les liaisons nécessaires entre le mur et le gros œuvre existant. Exécution soignée du mur selon les plans de conception, de manière à obtenir une qualité de surface suffisante pour les surfaces de pisé apparentes. Décoffrage. Si besoin, mise à nu délicatement des agrégats avec une brosse métallique, à la main ou à la machine. Planning et type de travaux de finition selon les prescriptions. Protection contre les intempéries et le gel si nécessaire, sans interruption pendant et hors temps de travail jusqu'à la réception des travaux. Épaisseur du mur : 30 cm.

Pisé : sol en pisé → 200 à 350 min

Vérification de la stabilité et de l'adéquation du support. Contrôle de la consistance et de l'homogénéité de la terre à pisé. Application en plusieurs couches d'épaisseur appropriée du mélange à pisé. Compactage soigneux, uniforme, réalisé en plusieurs passes manuellement ou avec une machine. Incorporation d'un géotextile à grandes mailles dans la partie haute de la couche inférieure du sol en pisé. Si besoin, pose de baguettes de bordure le long des murs pour éviter les fissures en surface. Exécution de la finition du sol selon les prescriptions, permettant une exposition durable de la surface apparente qui restera sans revêtement.

Industrie

- ▶ Limite du mimétisme industriel
- ▶ Le produit labélisé remplace la main d'œuvre qualifiée
- ▶ Le réseau de distribution

Culturel

- ▶ Culture générale du grand public
- ▶ Références belges méconnues
 - construction contemporaine
 - construction vernaculaire
- ▶ Image d'un positionnement militant



Changer de paradigme et construire la résilience

- ▶ Les marchandises doivent circuler le moins possible,
- ▶ les hommes et les idées peuvent circuler le plus librement possible
- ▶ et les capitaux pas du tout.

John Maynard Keynes (1883-1946) économiste britannique





- ▶ Il faut **décloisonner** les métiers et développer un processus de décision et de conception collaboratif
- ▶ **Transmettre** les savoir-faire et vulgariser les connaissances, encore et encore
- ▶ **Innover** pour un usage dans le contexte socio-économique actuel
- ▶ La construction en terre présente une grande **diversité** de techniques
- ▶ Les changements doivent être **institutionnels** et systémiques





Guide bâtiment durable

www.guidebatimentdurable.brussels



Sites internet

- Béton d'Argile Environnemental, amàco et CRAterre-AE&CC-ENSAG, 2016

https://amaco.org/wp-content/uploads/2020/04/Brochure_Beton_Argile_Environnemental.pdf



Ouvrages

- Le monde sans fin, Jancovici – Blain, Dargaud, 2021
- Construire en terre allégée, Frans Volhard, Actes sud, 2016
- Construction & design with rammed earth, Martin Rauch, Detail, 2015
- Construire en terre – Construction – Rénovation - Finitions, U. Röhlen & Ch. Ziegert, Le moniteur, 2013
- Bâtir en terre - Du grain de sable à l'architecture, L. Fontaine & R. Anger, Belin, 2013
- Traité de construction en terre, H. Houben & H. Guillard, Parenthèses, 1989 – 1995



Associations

- La Voûte nubienne (AVN)

Economie locale : matériaux + main d'œuvre (principalement Burkina Faso et Mali)

Habitat durable, confortable, économique, adapté au plus grand nombre

Lutte contre la déforestation

Formation des maçons + aide à l'entrepreneuriat

Sensibilisation et prospection des clients

- 5 200 chantiers réalisés

- 1160 apprentis, maçons et artisans VN actifs

- 53 000 bénéficiaires

<https://www.lavoutenubienne.org/>



- Enerterre

Parc naturel régional des Marais du Cotentin et du Bessin

10 000 bâtiments en terre dont 4 000 maisons.

Lutte contre la précarité énergétique

Chantiers participatifs

Système d'Echange Local (SEL)

<https://www.enerterre.fr/>



Cédric Evrard

Ingénieur structure

Prototype srl

Louvain-la-Neuve

☎ +32 472 20 33 75

✉ cedric.evrard@gamil.com



⇒ **La nécessité est mère
de l'invention**

Platon (427-348 ACN)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

