

FORMATION BÂTIMENT DURABLE

ECONOMIE CIRCULAIRE :
TERRE CRUE

AUTOMNE 2024

La robustesse des ouvrages en terre crue

Comment aborder la réflexion structurelle en évitant le paradigme
de la performance ?

Cédric EVRARD





- ▶ Quelle philosophie adopter ?
- ▶ Décrire la terre crue dans le contexte de la transition
- ▶ Aborder le matériau terre et ses techniques de mise en œuvre
- ▶ Illustrer les outils de l'ingénieur



LA ROBUSTESSE

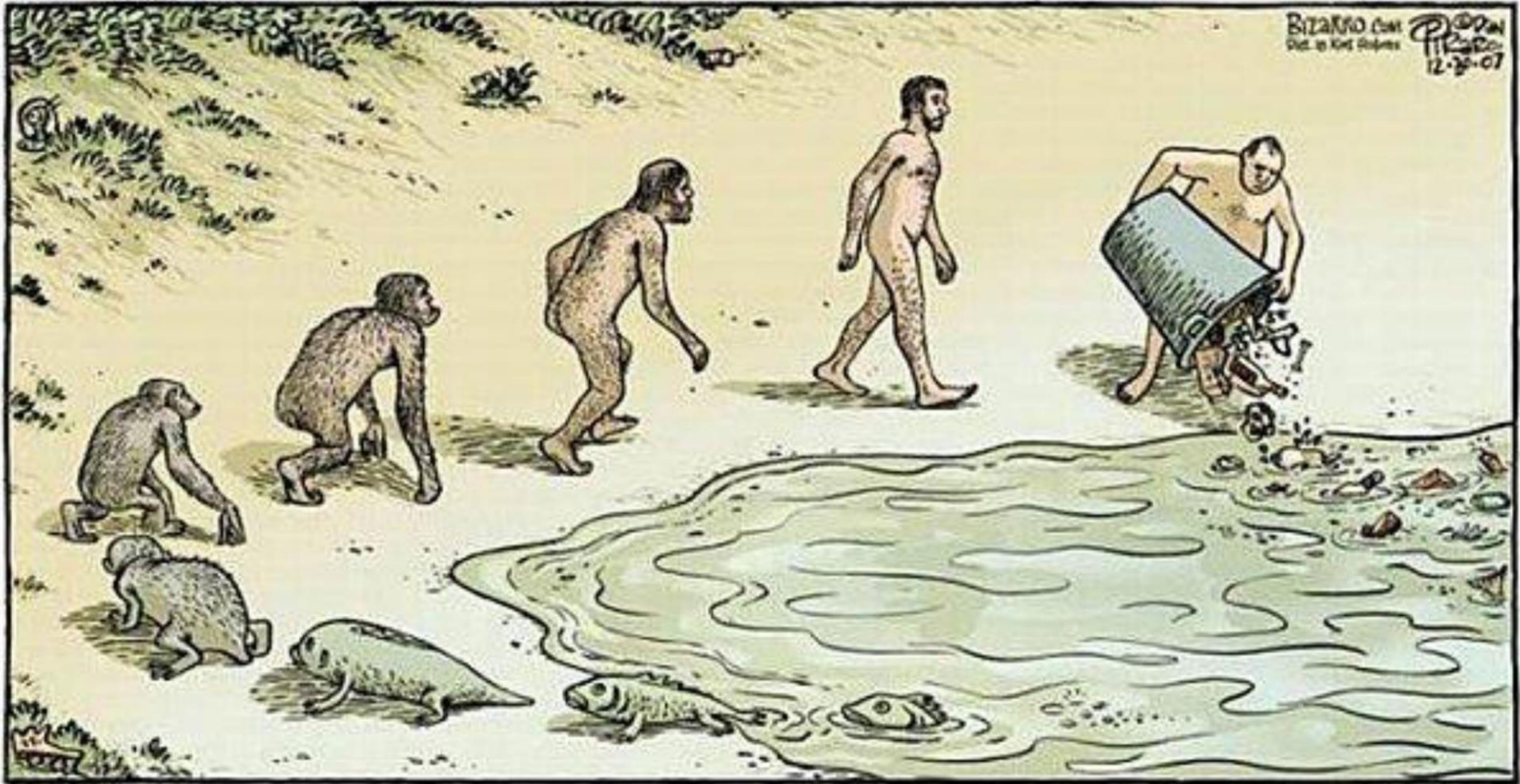
- ▶ La performance
- ▶ Les fluctuations
- ▶ La robustesse

APPLICATION À LA TERRE CRUE

SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE



Cycle de vie



Comment faire pour que ça s'arrête ?



Olivier HamantTEDx Talks: https://www.youtube.com/watch?v=QI2_sO30ITY**Performance = Efficacité + Efficience**

Atteindre son objectif avec le moins de moyens possible

Mais

- Optimiser fragilise
- Effet rebond (la performance permet de produire plus, donc de consommer plus)
- Loi Goodhart (lorsqu'une mesure devient un objectif, elle cesse d'être une bonne mesure)
- Coût écologique (Climat, Biodiversité, Pollution)



© Babelio

Nous sommes addictes à la PERFORMANCE

Pour remédier à la crise écologique on propose plus de performance : le tout électrique, le tout numérique, l'agriculture par drone ...



Quittons la performance

- ▶ Le burnout des humains et des écosystèmes
- ▶ La pauvreté des interactions



© JOHN WESSELS



© HR MAPS

Il n'y a pas grand-chose à regretter de la performance



Un monde fluctuant

L'environnement naturel présente une variabilité imprévisible et redoutable : inondations, tempêtes, feux de forêt, sécheresse, glaciation,

...

**Pour faire face aux fluctuations,
le vivant a adopté une stratégie de contre-performance**



Exemple la température corporelle :

- A 37°C, les protéines et les enzymes du corps ne sont pas utilisées à leur optimum. Ils fonctionnent à 50% de leur performance
- A 40°C, le métabolisme, le système immunitaire sont à leur optimum
- Transitoire : on ne peut pas rester à sa performance maximum (40°C) plus de 3 jours.

La montée en température du corps existe pour parer à une fluctuation imprévisible.



Exemple de la photosynthèse :

apparus il y a 3,8 milliards d'années, elle transforme un gaz en un fluide carboné. Mais le rendement énergétique est de l'ordre de 0,5 % (un panneau solaire c'est 15%)

Les êtres vivants sont robustes car ils ne sont pas performants

- ▶ Ils ne sont pas parfaitement adaptés, ils sont adaptables
- ▶ Ils ne renforcent pas leurs points forts, ils se construisent sur leurs points faibles

La ROBUSTESSE du vivant

L'objectif du vivant est de maintenir le système stable malgré les fluctuations.

- *incertitudes politiques;*
- *incertitudes sanitaires,*
- *incertitudes écologiques,*
- *incertitudes énergétiques*

Face à un monde de plus en plus fluctuant, Il faut construire la robustesse

Exemple : Agro-industrie ↔ Permaculture



LA ROBUSTESSE PAR OLIVIER HAMANT

APPLICATION À LA TERRE CRUE

- ▶ **Aménagement du territoire**
- ▶ Performance énergétique
- ▶ Matériau de construction : la terre
- ▶ Techniques de mise en œuvre

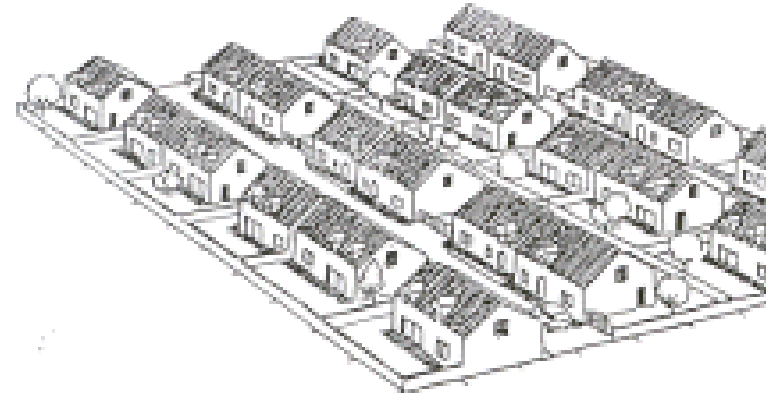
SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE



Aménagement du territoire

Étalement urbain

- ▶ L'urbanisation détruit la campagne au profit du mode de vie citadin.
 - Préserver nature et campagne
- ▶ La densification résidentielle des territoires à des fins de développement durable.
 - Réduire les besoins de transport



- Ce sont nos habitudes qui construisent les crises
- L'abondance stimule la compétition individuelle

La robuste = réfléchir en amont de l'usage des matériaux géo-bio-sourcés



Aménagement du territoire



Habitat groupé et coopérative

- ▶ Vivre ou travailler à plusieurs dans un esprit de solidarité (robustesse sociale et psychologique)
- ▶ Qualité de vie et en confort grâce aux parties communes.
- ▶ La cohabitation requiert des décisions de groupe, de définir des règles communes, ... ce qui n'est pas évident.

- Seul, on va plus vite ; ensemble, on va plus loin
- Développer un processus de décision et de conception collaboratif

La robuste = réfléchir en amont de l'usage des matériaux géo-bio-sourcés





Shibam, Yémen, ville fortifiée du 17^e siècle

LA ROBUSTESSE PAR OLIVIER HAMANT

APPLICATION À LA TERRE CRUE

- ▶ Aménagement du territoire
- ▶ **Performance énergétique**
- ▶ Matériau de construction : la terre
- ▶ Techniques de mise en œuvre

SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE



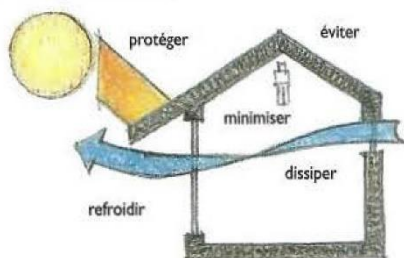
Performance énergétique des bâtiments

Architecture bioclimatique

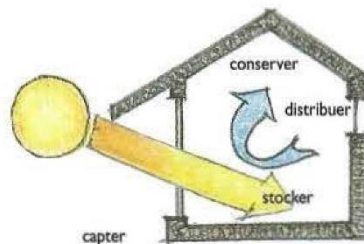
1. climat et environnement
2. enveloppe et architecture
3. mode de vie des habitants
4. capter et protéger
5. chauffer et ventiler



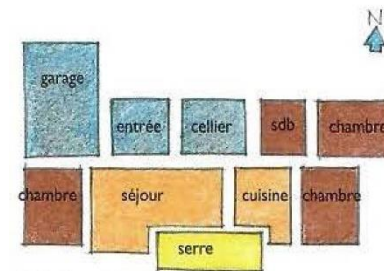
Stratégie du froid



Stratégie du chaud



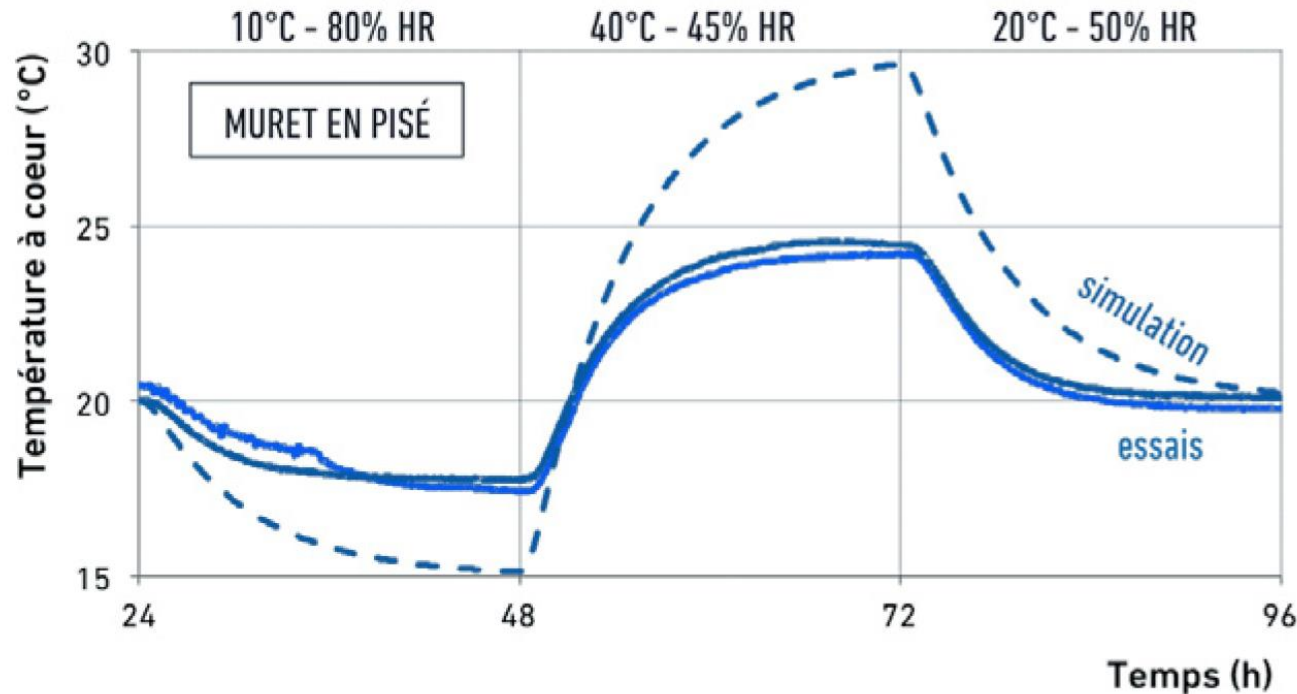
La robustesse = s'adapter à son environnement ⇒ plus que simplement passif



Principes du zonage thermique.



Performance énergétique de la terre



- 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.

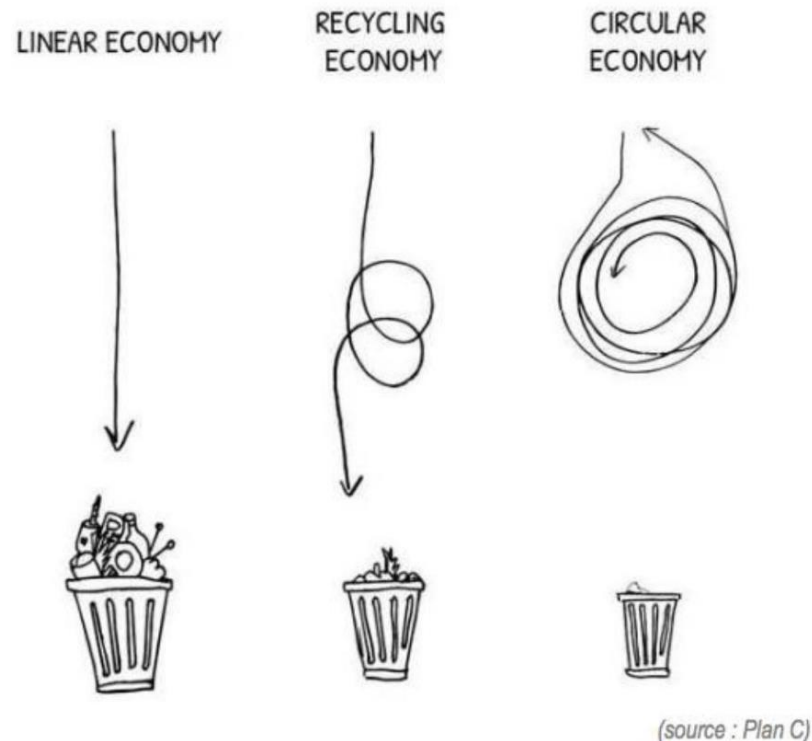
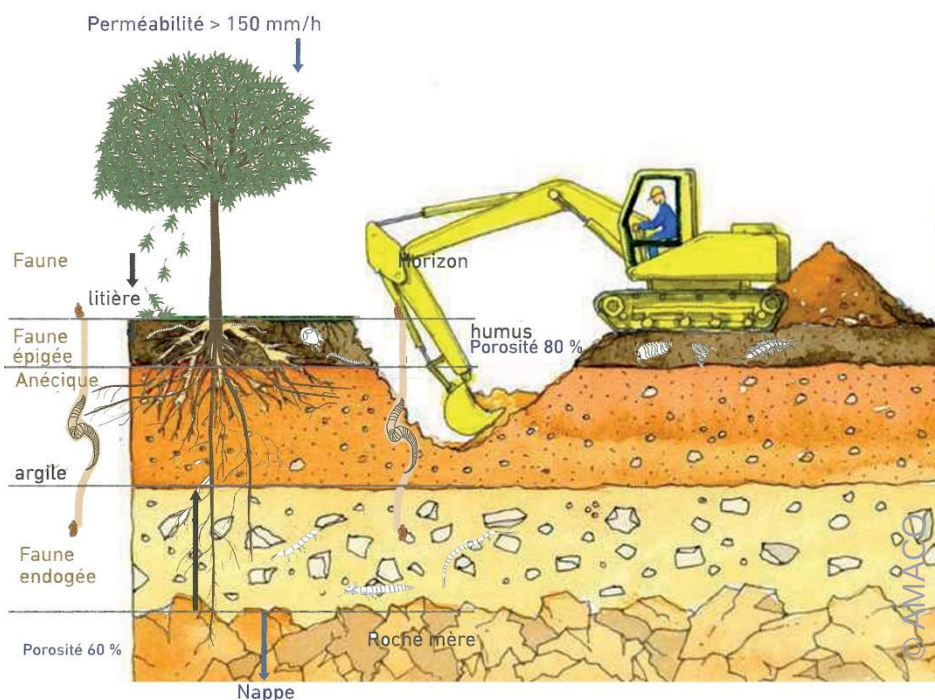
L'eau change d'état : elle s'évapore ou se condense en absorbant ou en libérant de l'énergie.

La robustesse = profiter des bonus difficiles à quantifier et non reconnus par les normes



Matériau de construction : la terre

Matériau local, abondant et nécessitant peu de transformation

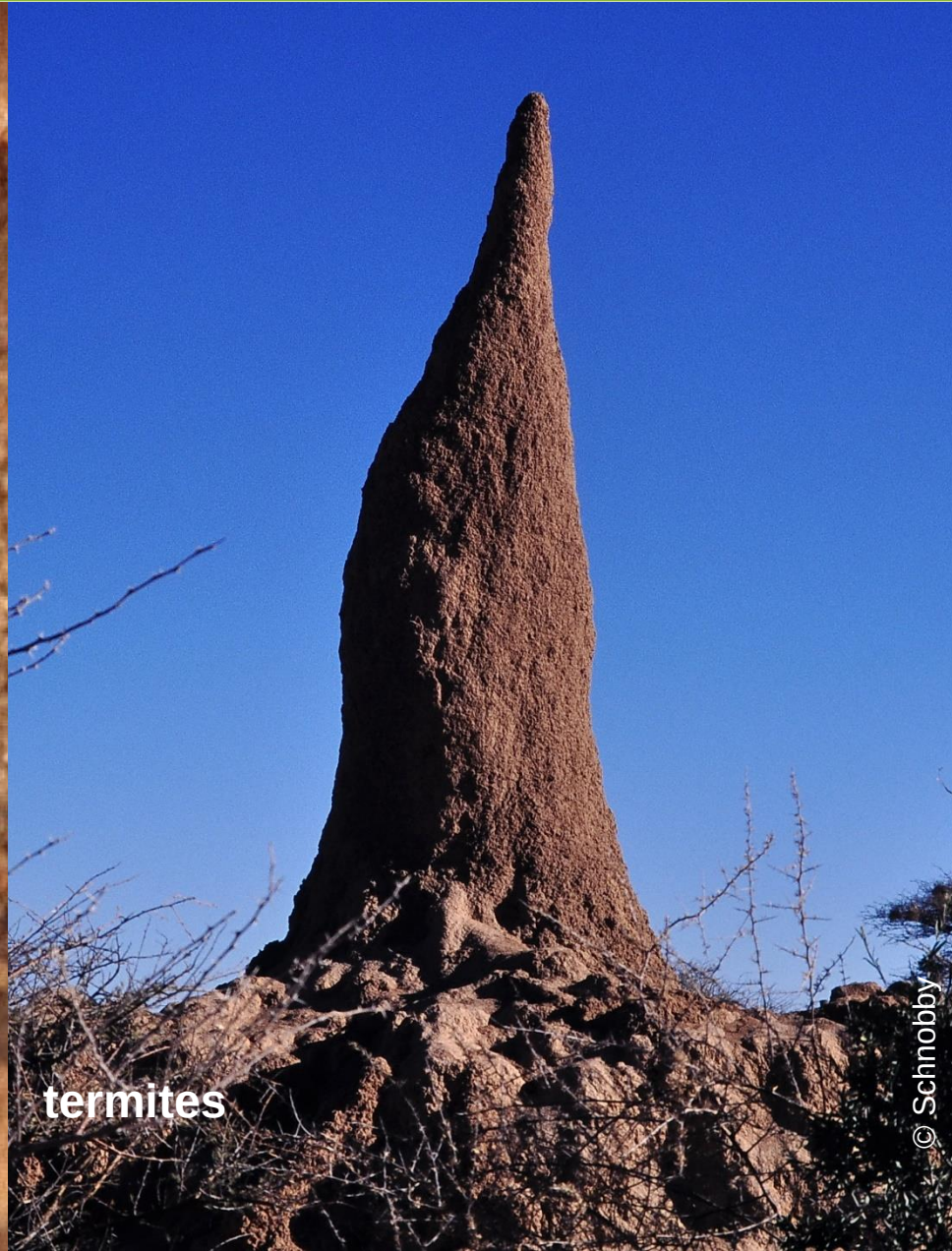


**Matériau circulaire idéal,
mais à partager avec les autres vivants**





abeille solitaire



termites

APPLICATION À LA TERRE CRUE

Résistance à la compression



Matériau peu performant

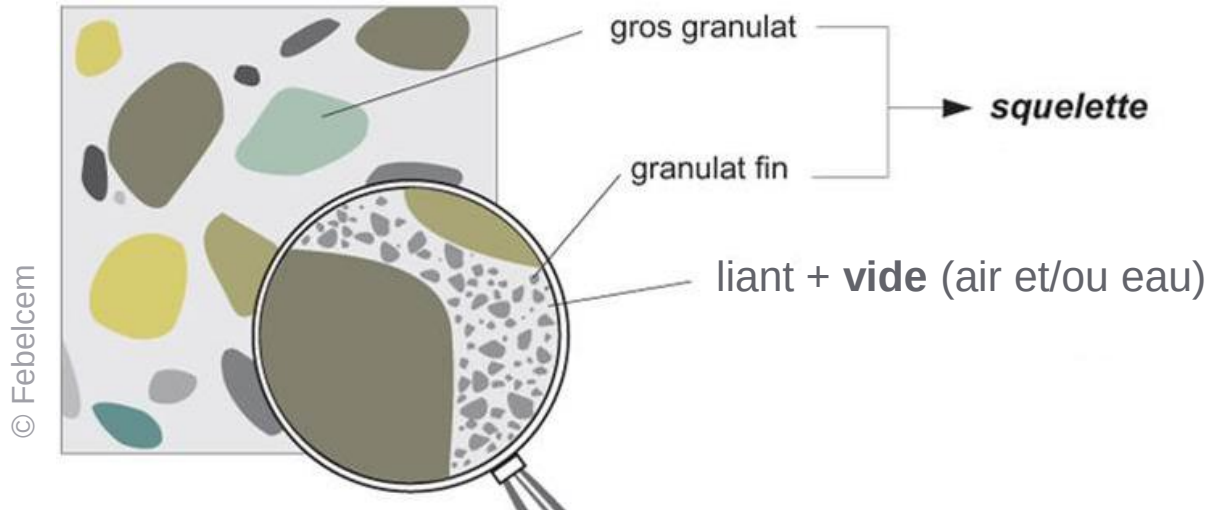


→ robustesse sociale = richesse des interactions



APPLICATION À LA TERRE CRUE

La terre, un assemblage de matériaux de nature minérale.



- ▶ Moins il y a de vides plus il est résistant.

Ça ressemble à du béton

- ▶ Prédire la résistance par des mesures expérimentales.
- ▶ Le lien entre microstructure et propriétés mécaniques est extrêmement complexe.

Mais pas de norme !



Comparaison au béton : composition du mélange

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

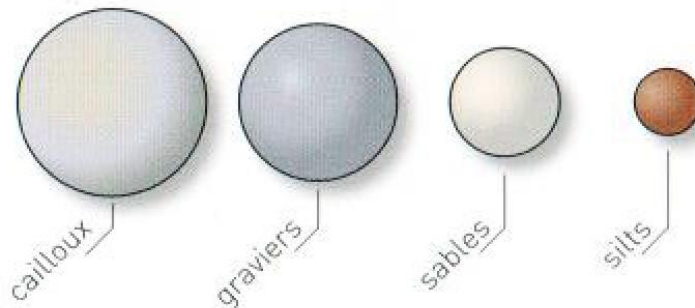
Liant : matière susceptible
d'en agglomérer d'autres
(ciment, chaux, argile,...).

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

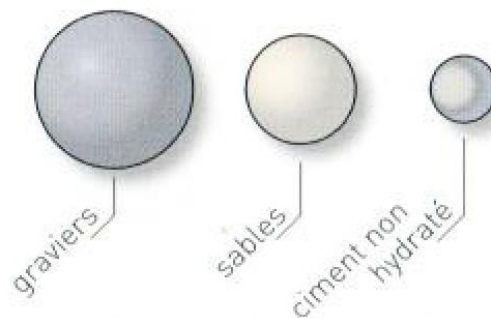
Adjuvants : modifient les
propriétés physiques et
chimiques du mélange

MATIÈRE EN GRAINS

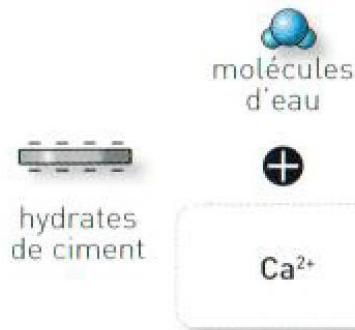
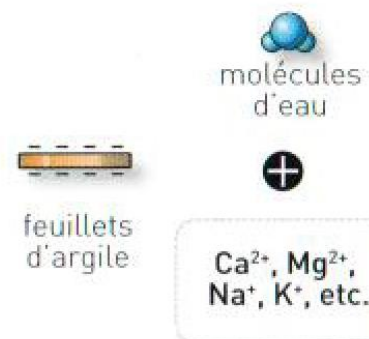
Mur en pisé



Béton de ciment



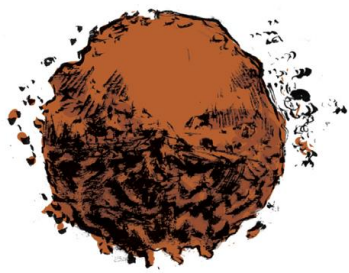
MATIÈRE COLLOÏDALE



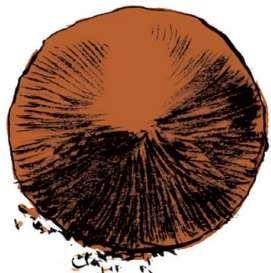
Le squelette

Quelle terre pour construire ?

- ▶ envisager la possibilité de reformuler le mélange.
- ▶ études pluridisciplinaires préalables
 - Trouver la matière première à proximité du site de construction
 - Déterminer les amendements



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



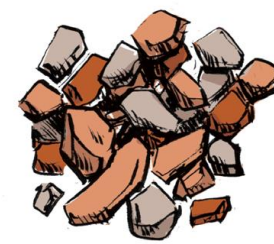
des silts
 $60\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$



des sables
 2mm à $60\mu\text{m}$



des graviers
 2cm à 2mm



des cailloux
 20cm à 2cm

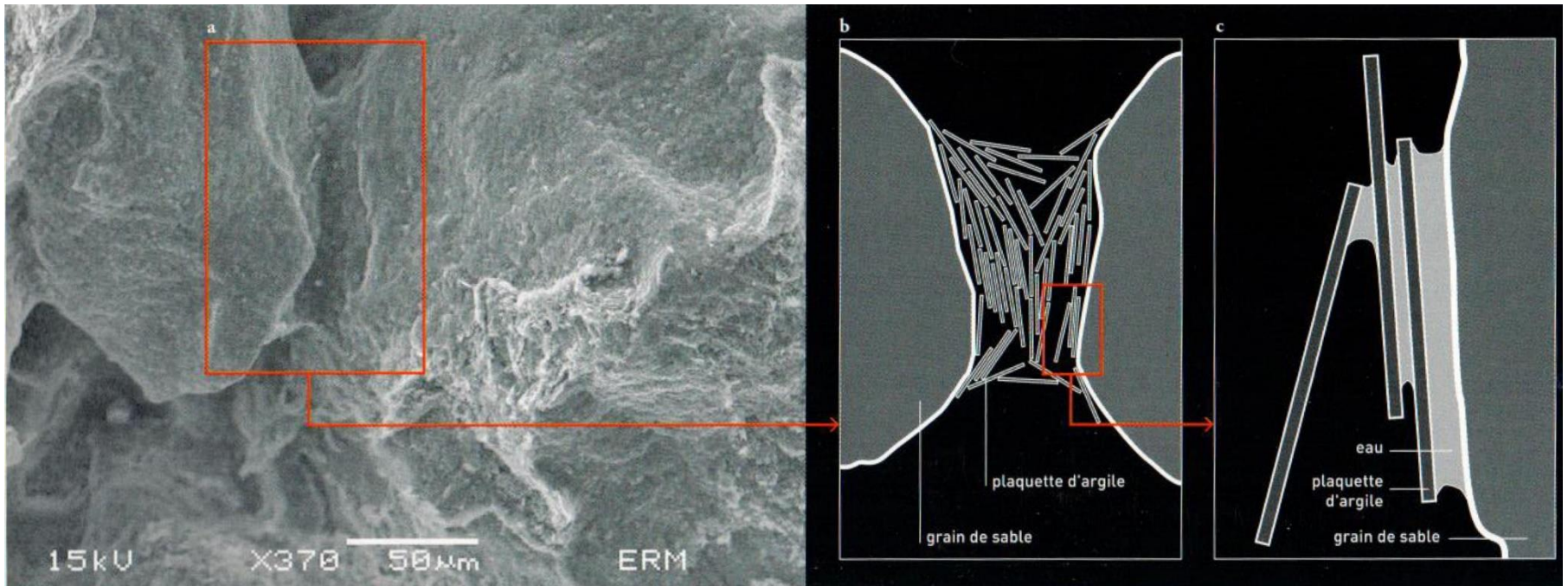
Le SOURCING = essor de la terre crue



Le liant

Argile + eau + air = pont capillaire

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



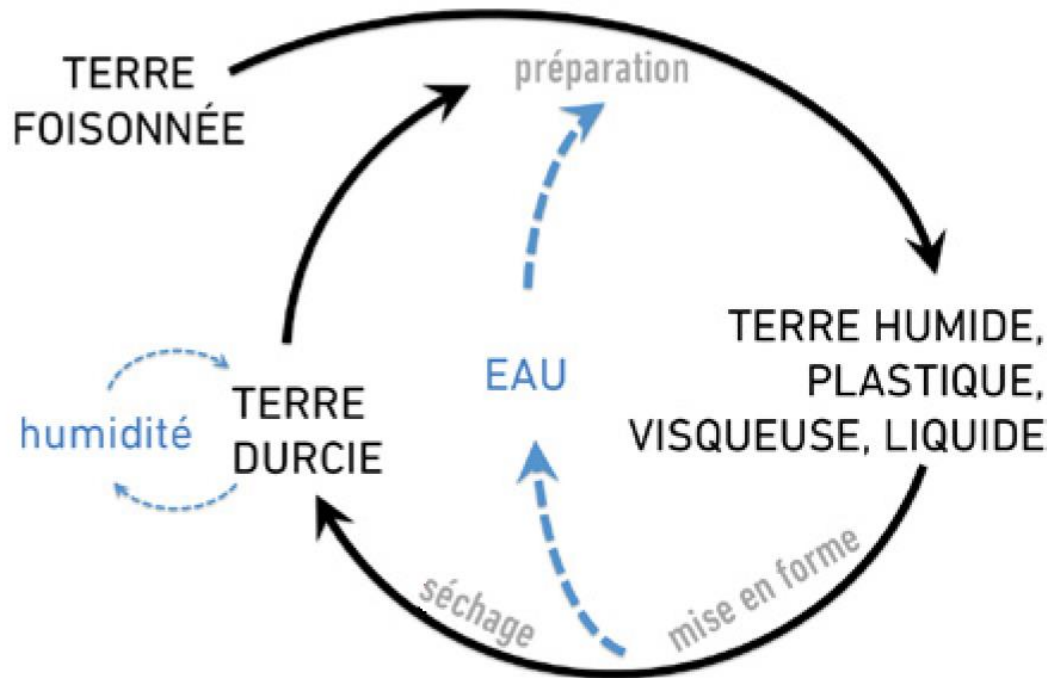
Pont capillaire ↔ interface eau-air

- 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 à l'infini de l'argile (terre crue)

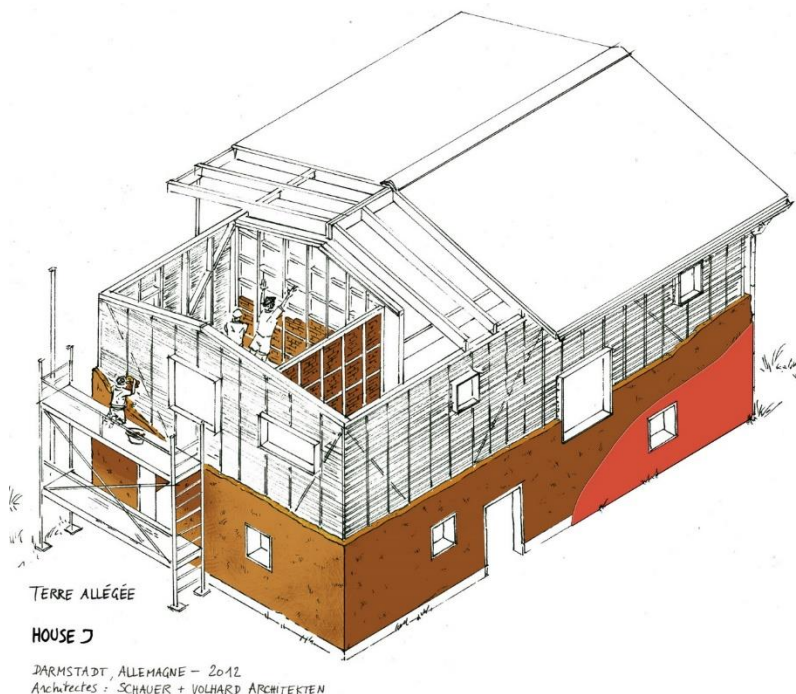
Attention aux amendements pour augmenter ses performances



Techniques de construction

La terre non structurale : Les ENDUITS.

- ▶ Simple.
- ▶ Pas de risque
- ▶ Pas d'allergies
- ▶ Bon régulateur de l'humidité ambiante



La terre non structurale : le TORCHIS et terre allégée.

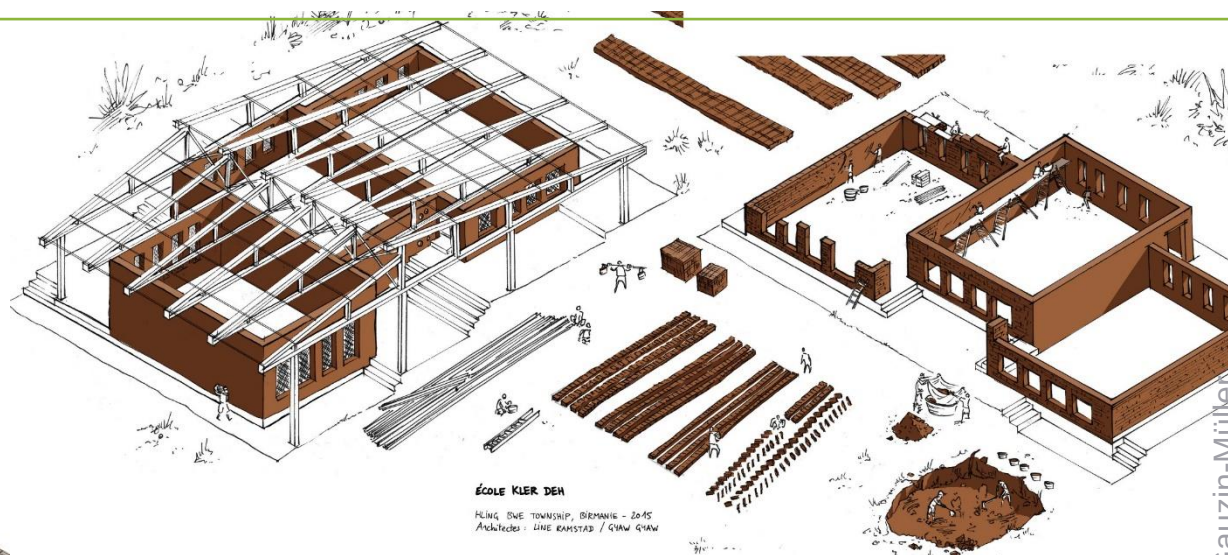
- ▶ Le mélange mis en œuvre à l'état plastique sur un lattis (bois, osier, bambou) ou un clayonnage, fixé dans une ossature porteuse en bois appelée colombage.
- ▶ L'allemand Franz Volhard a développé un principe de « terre allégée » à base de paille mélangée à une barbotine argileuse.



APPLICATION À LA TERRE CRUE

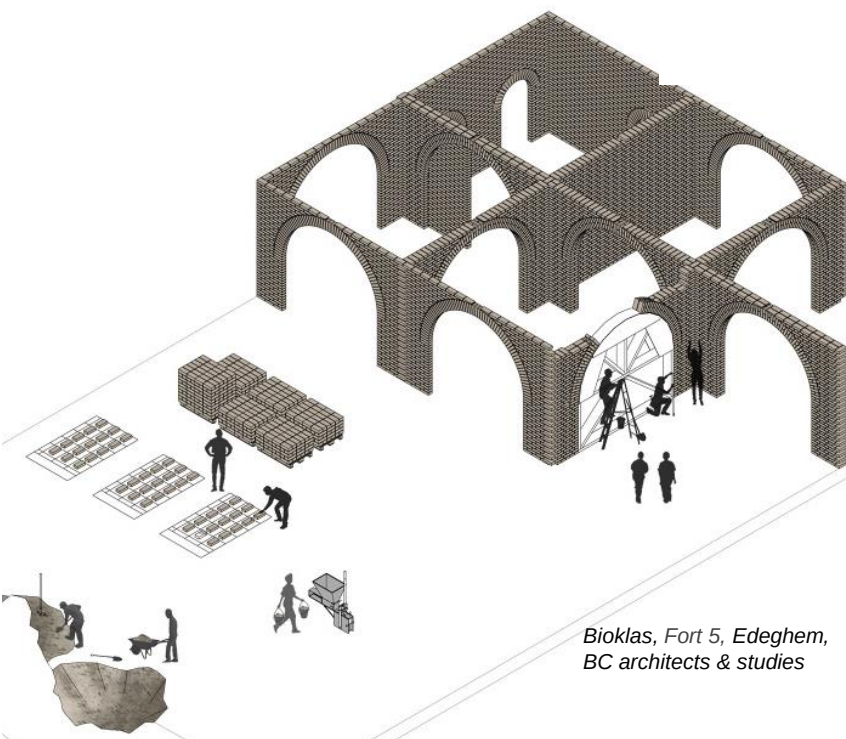
La terre comme élément porteur : l'ADOBE.

- brique de terre crue façonnée à la main ou moulée
- séchée pendant quelques jours à l'air libre ou sur des aires couvertes.



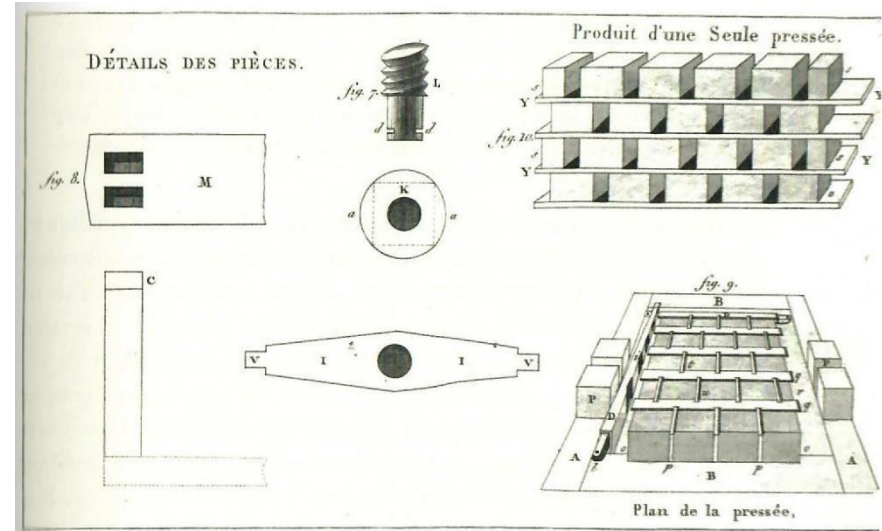
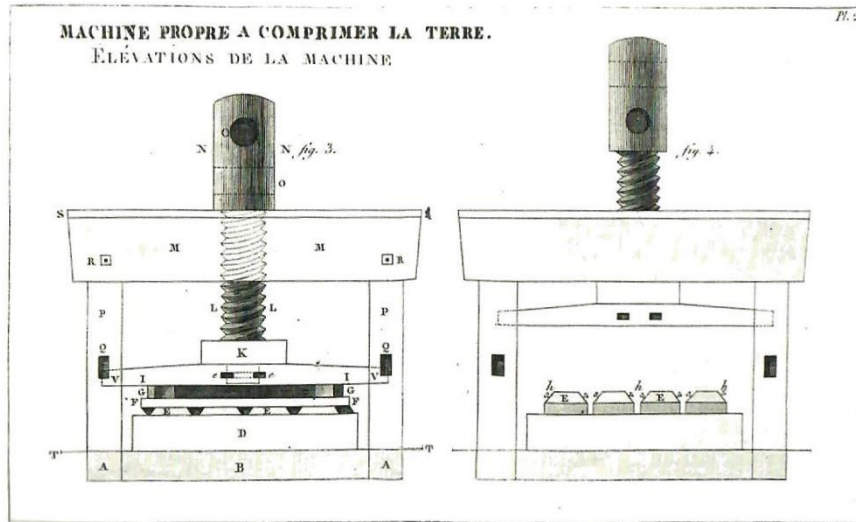
La terre comme élément porteur : la BTC = Brique de Terre Comprimée.

- fabriqués dans des presses manuelles ou mécanisées
- L'addition de ciment ou de chaux est courante pour augmenter les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'eau : **irréversible**



François Cointereaux (1740-1830)

- Machine à pierres factices (BTC), précurseur du bloc béton



Innovation et recherche

L'empereur condamne François Cointereaux à La Roche-sur-Yon car il a changé l'or en **ville de boue**



Pisé

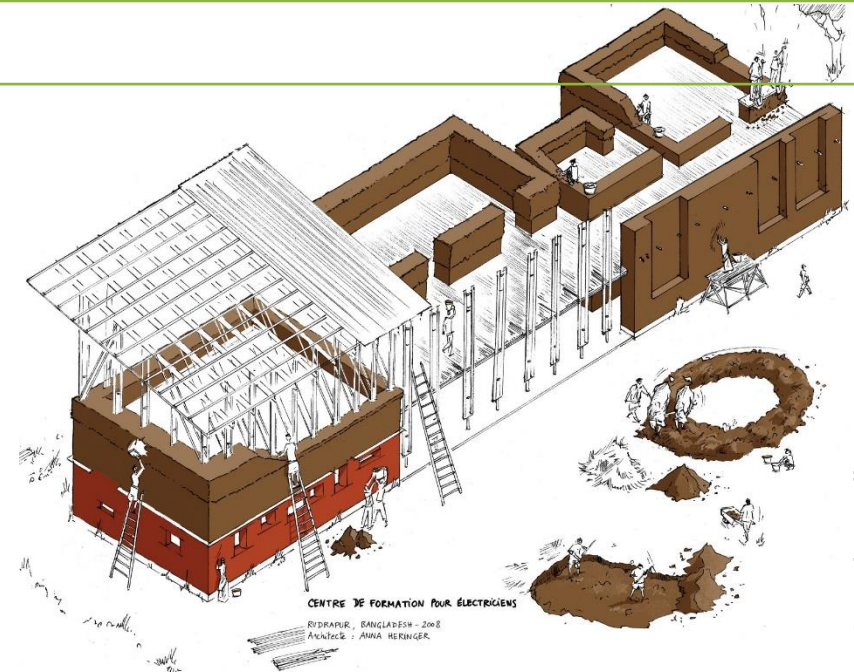
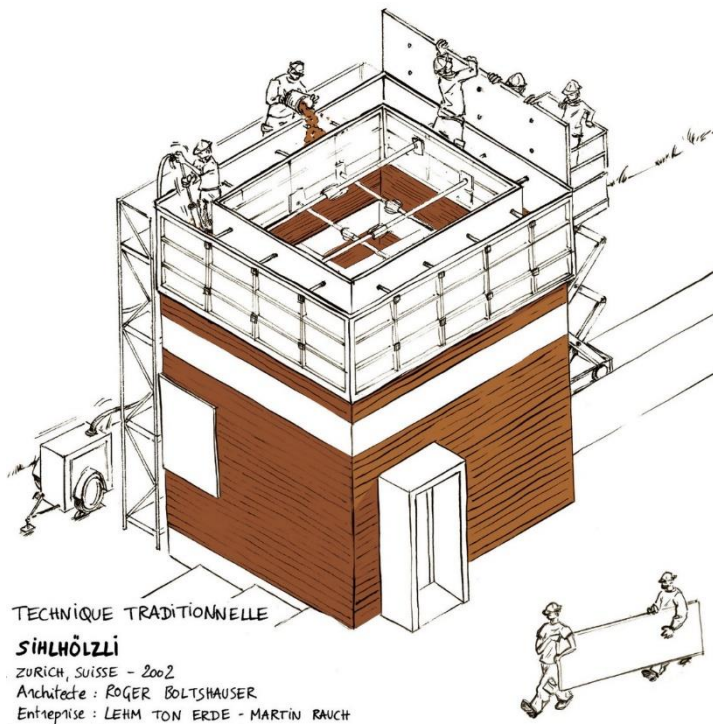


Chaux



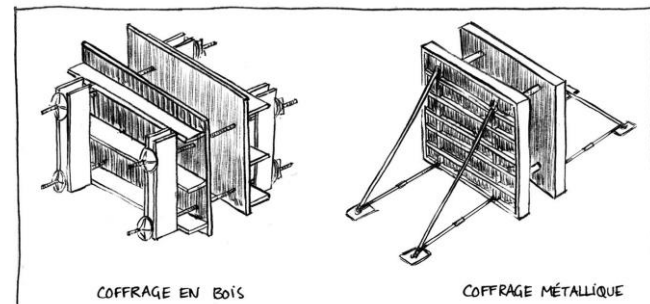
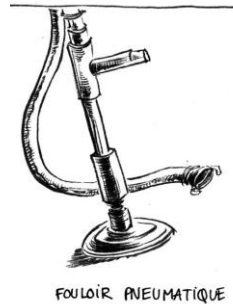
La terre comme élément porteur : la BAUGE.

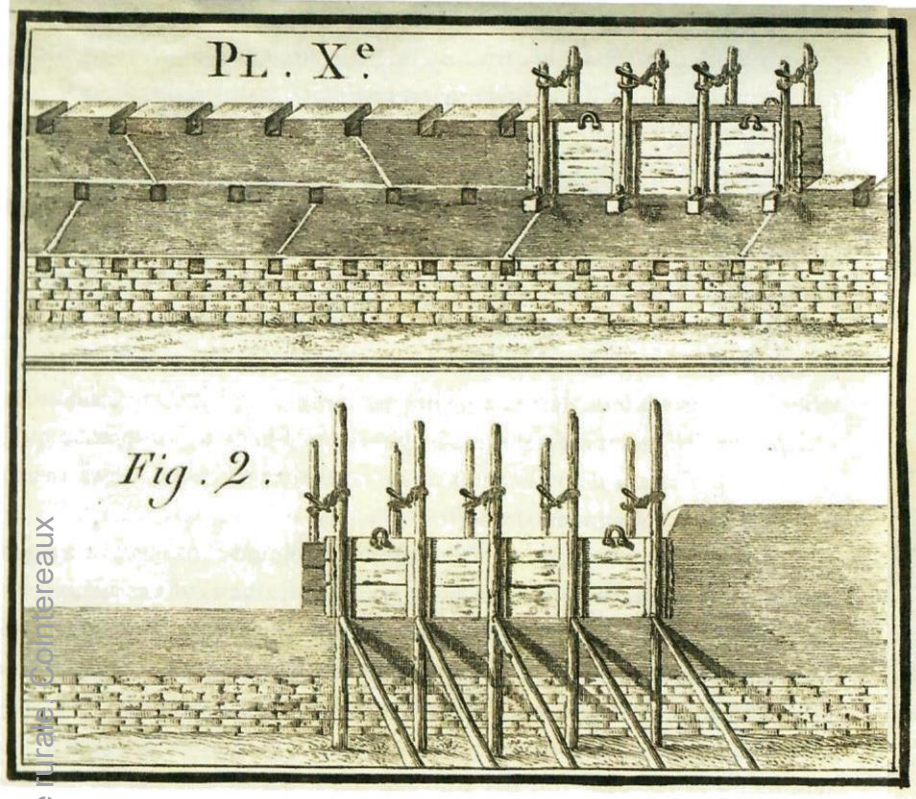
- ▶ murs massifs, monolithiques
- ▶ entre 40 et 60cm d'épaisseur.
- ▶ constitué d'un empilement de boules ou de tas de terre
- ▶ protection contre les intempéries



La terre comme élément porteur : le PISÉ.

- ▶ Ancêtre du béton
- ▶ Terre damée dans un coffrage
- ▶ Parfois amendée de ciment ou de chaux : **irréversible**





Moderniser la tradition



APPLICATION À LA TERRE CRUE

La terre comme élément porteur : le **BÉTON D'ARGILE** coulé sur place.

- ▶ connaissances, savoir-faire, technologies et innovations du béton de ciment transférables à la terre.
- ▶ Stabilisation par un liant hydraulique pour le décoffrage : entre 4 et 8% de chaux ou de ciment comparé 12 à 15% pour le béton
- ▶ **R&D** : bétons d'argile auto-durcissants sans ciment. Ajout d'un agent coagulant et/ou liquéfiant ayant une action différée dans le temps



coffrage



mise en œuvre

La terre, un matériau polymorphe adaptable aux circonstances



LA ROBUSTESSE PAR OLIVIER HAMANT

APPLICATION À LA TERRE CRUE

SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE

- ▶ **Bon sens**
- ▶ **Descente de charges**
- ▶ **Arcs et voûtes**
- ▶ **Détails techniques**
- ▶ **Proposition idéalisée**



Vers une construction simplifiée

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

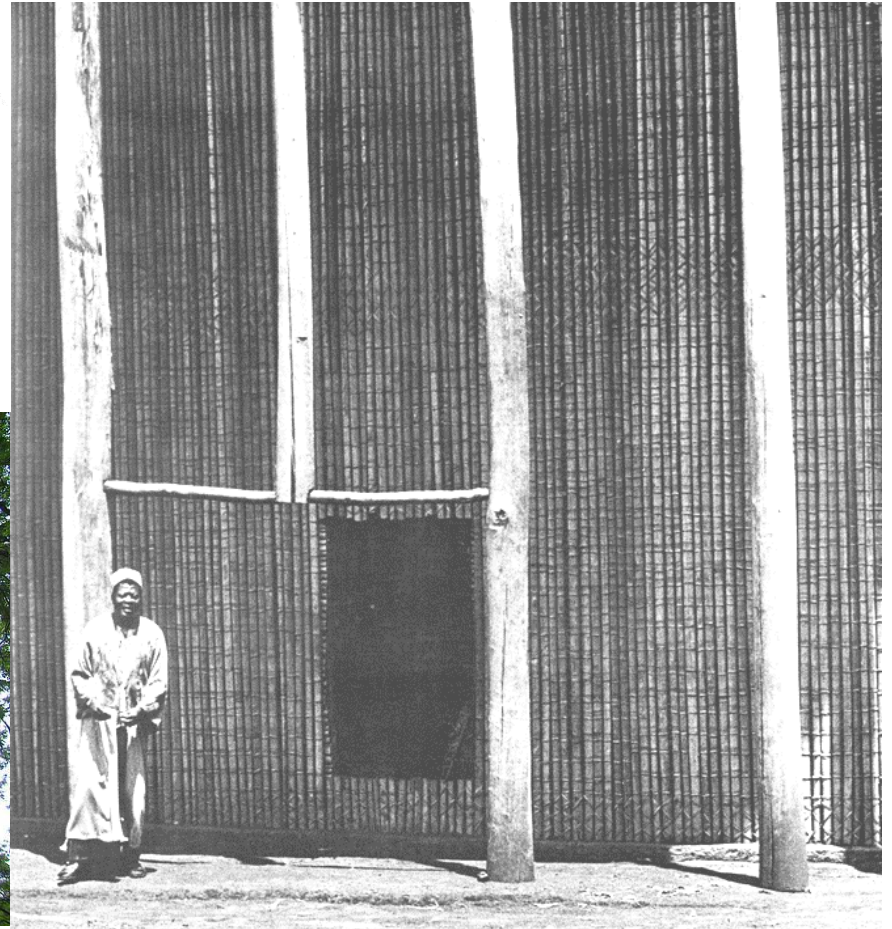
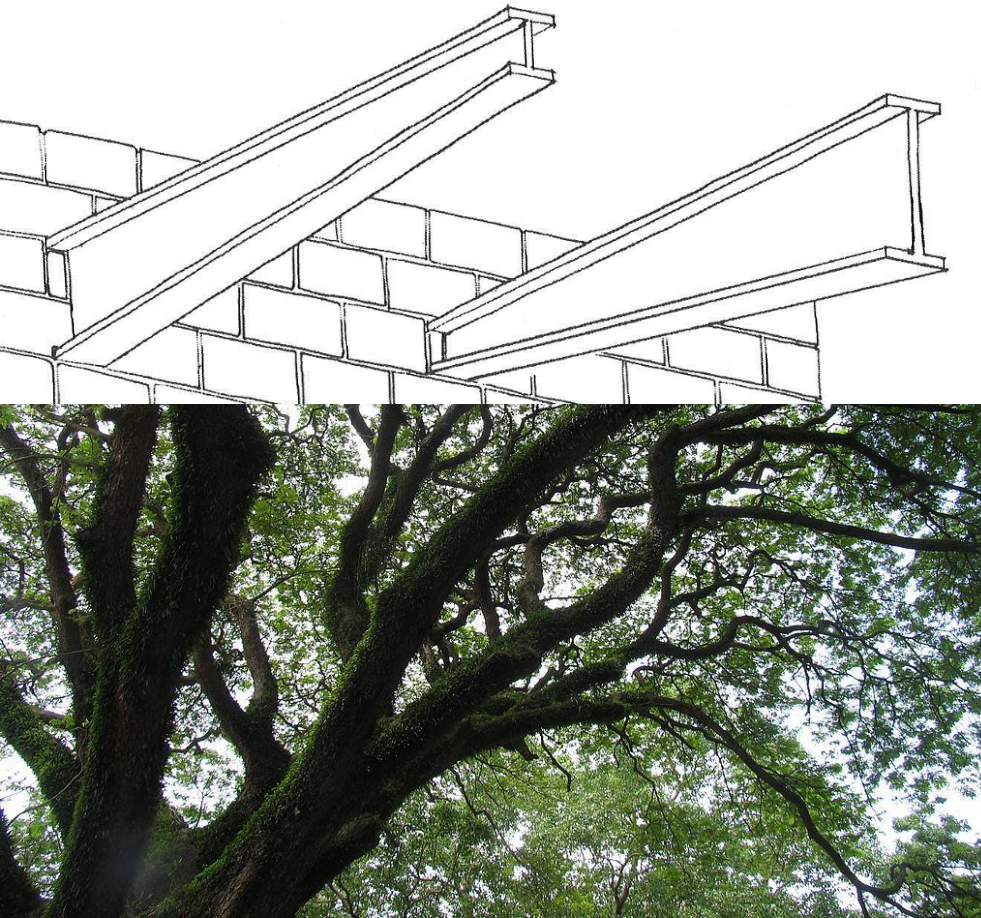


FRUGALITÉ
HEUREUSE
& CRÉATIVE



Le bon sens

- compréhension intuitive

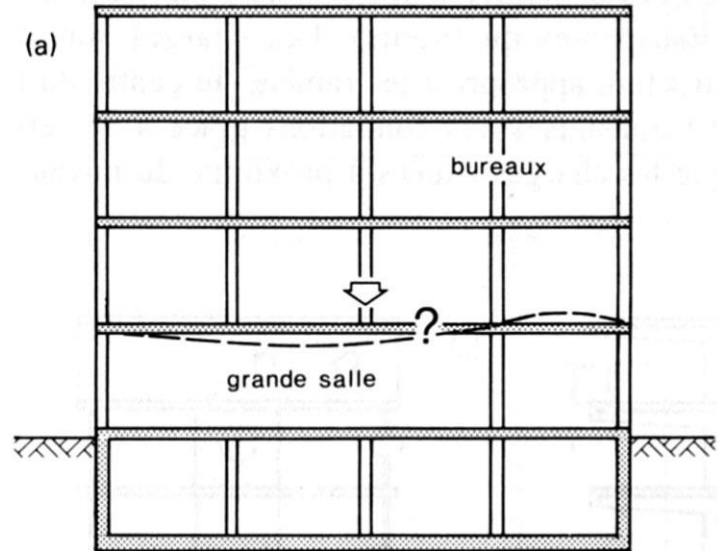
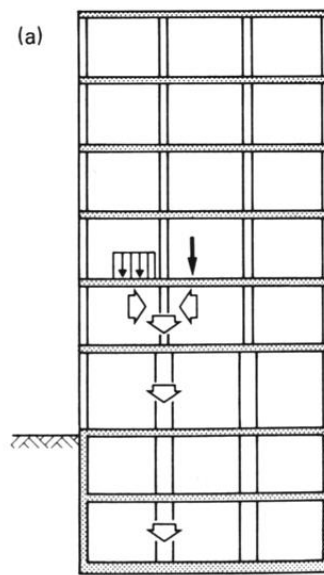
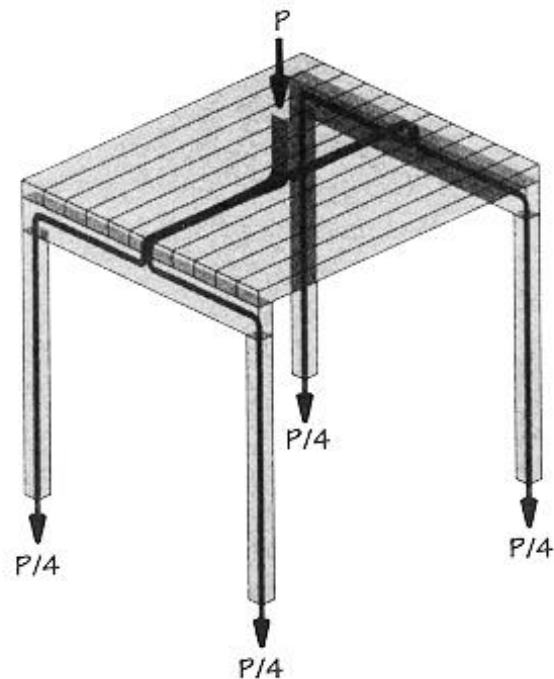


Puissance symbolique



La descente de charges

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



Points singuliers

Dans vos projets

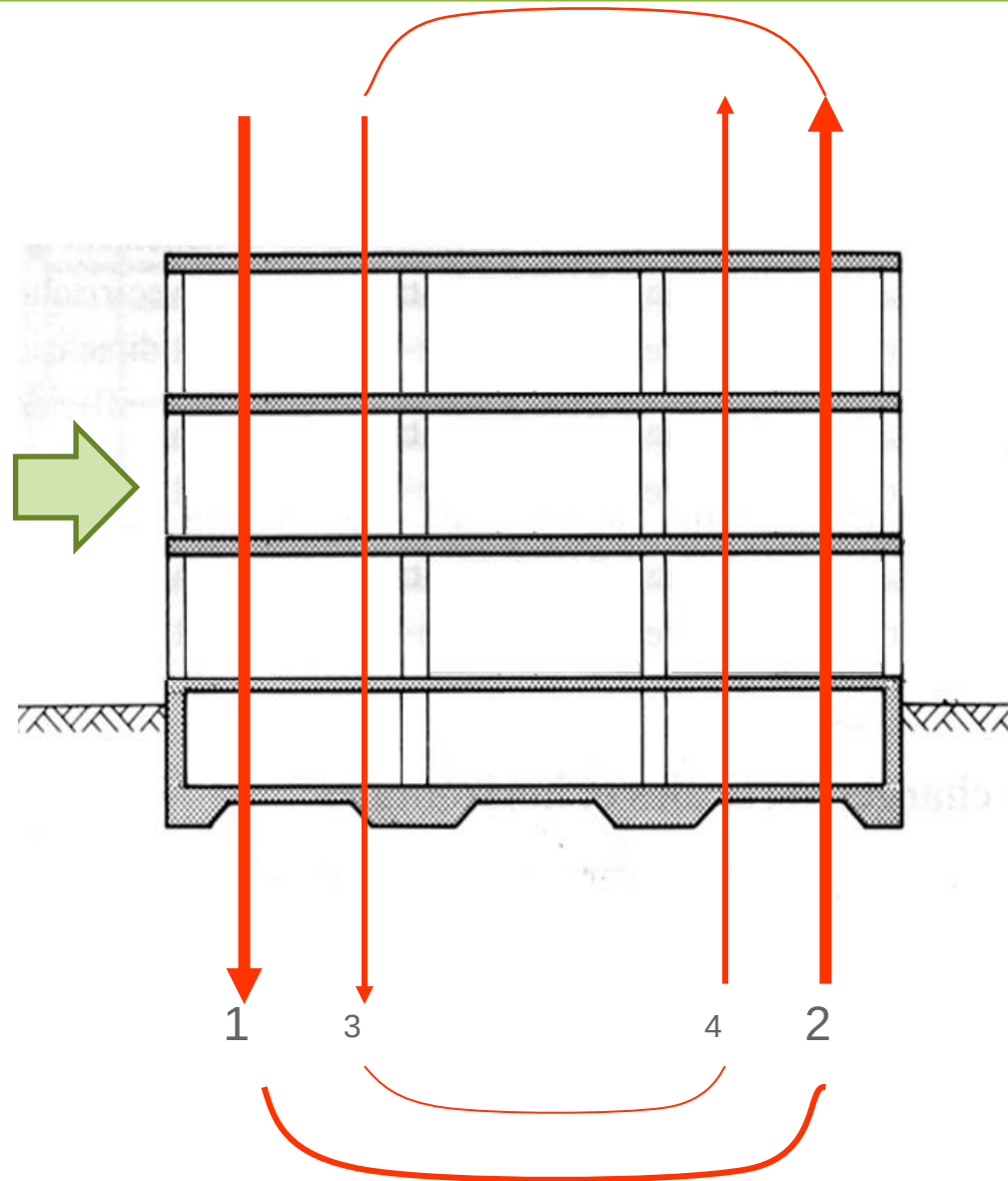
- ▶ Ne laissez pas ces questions en suspend
- ▶ Evitez les points singuliers

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, ...)

Itérations



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

Robustesse

Performance



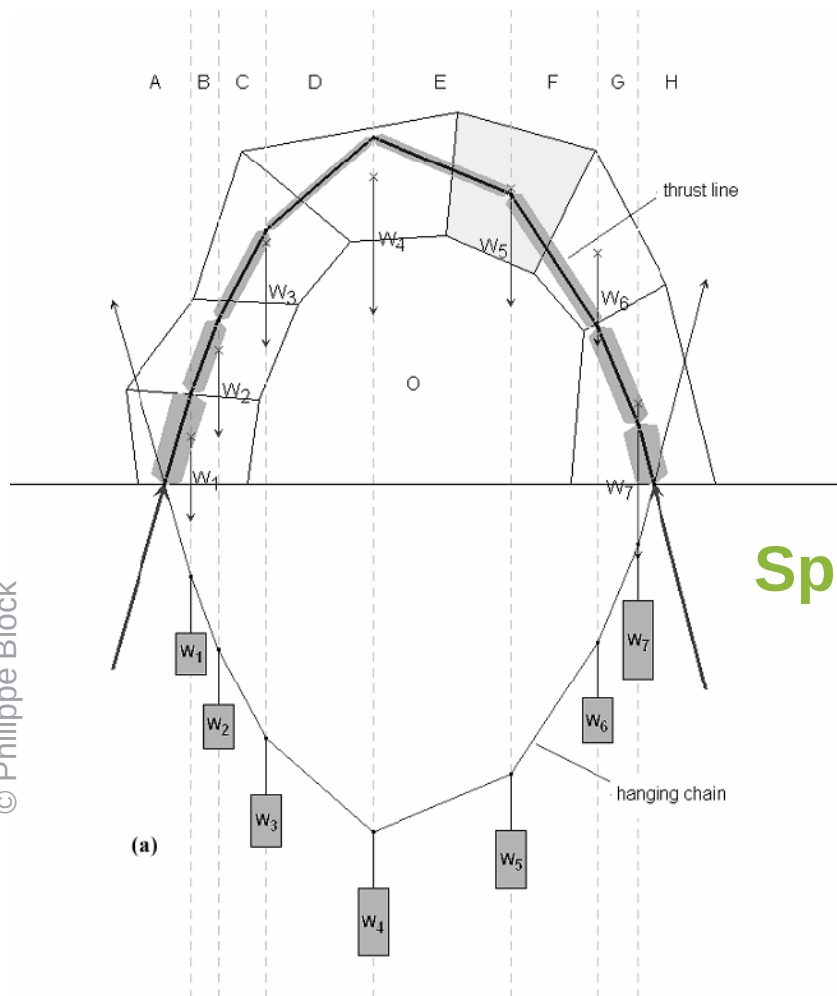
La terre travaille en compression

- Géométrie : statique graphique

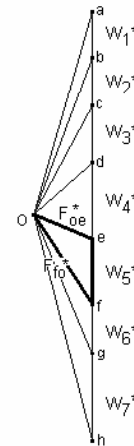
- *Que veux-tu brique ?*

- *J'aime l'arc*

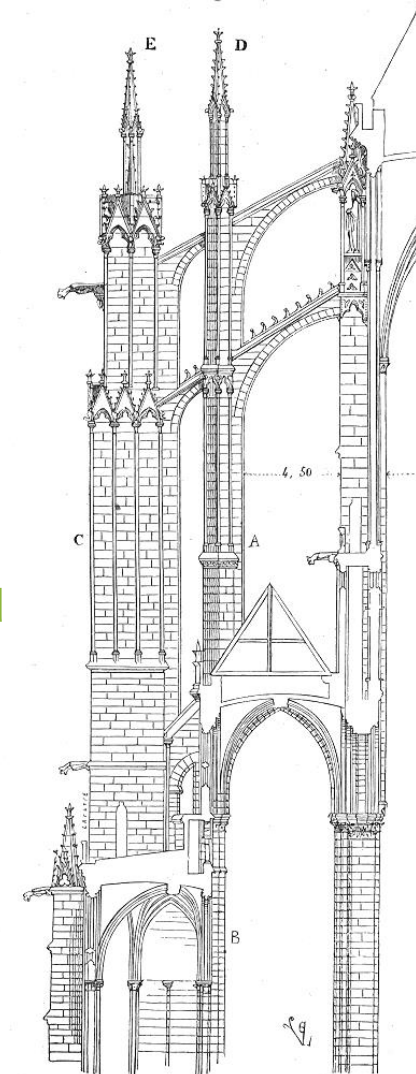
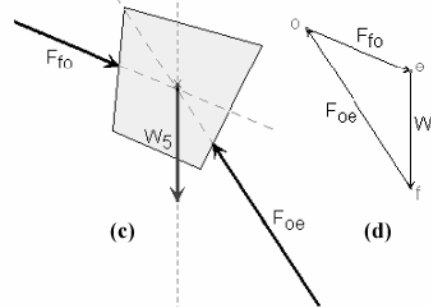
Louis I. Khan



(b)

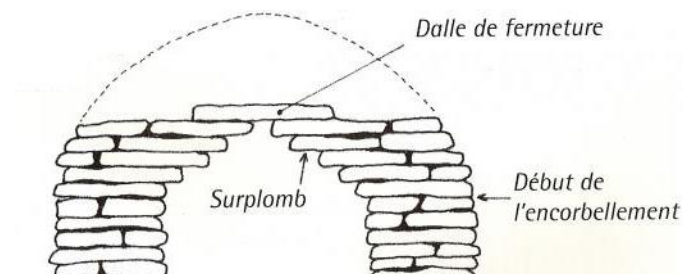


Spécificité du matériau

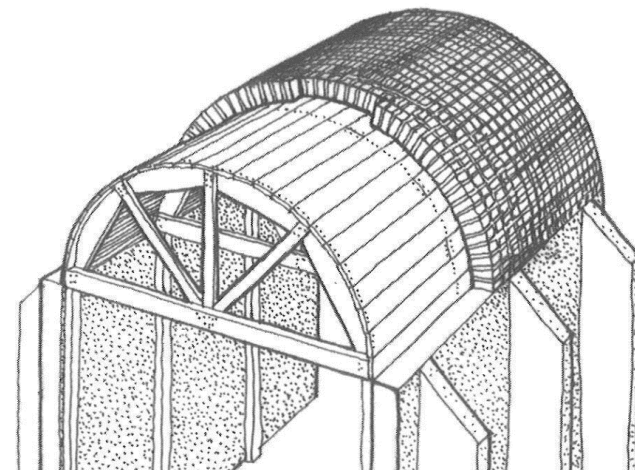


Mise en œuvre

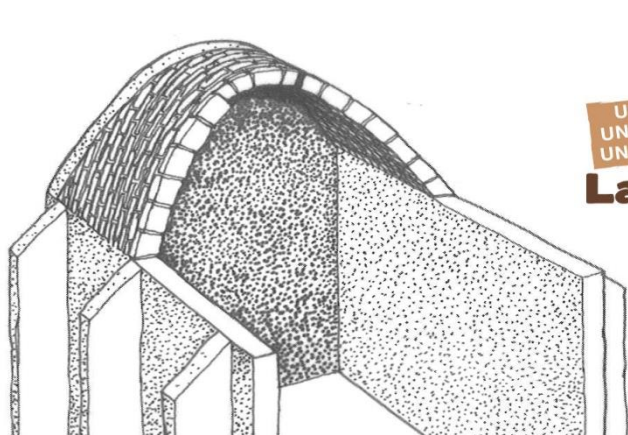
► Encorbellement



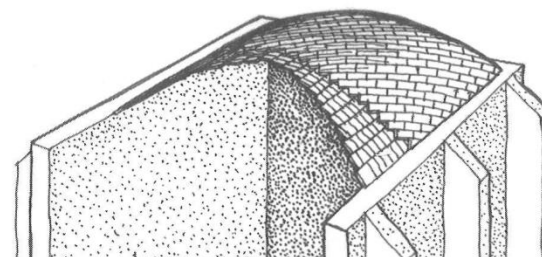
► Arc et voûtes à voussoirs



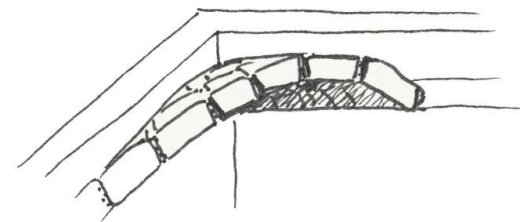
► Voûte nubienne



► Voûte catalane ou sarrasine



► Voûte mexicaine

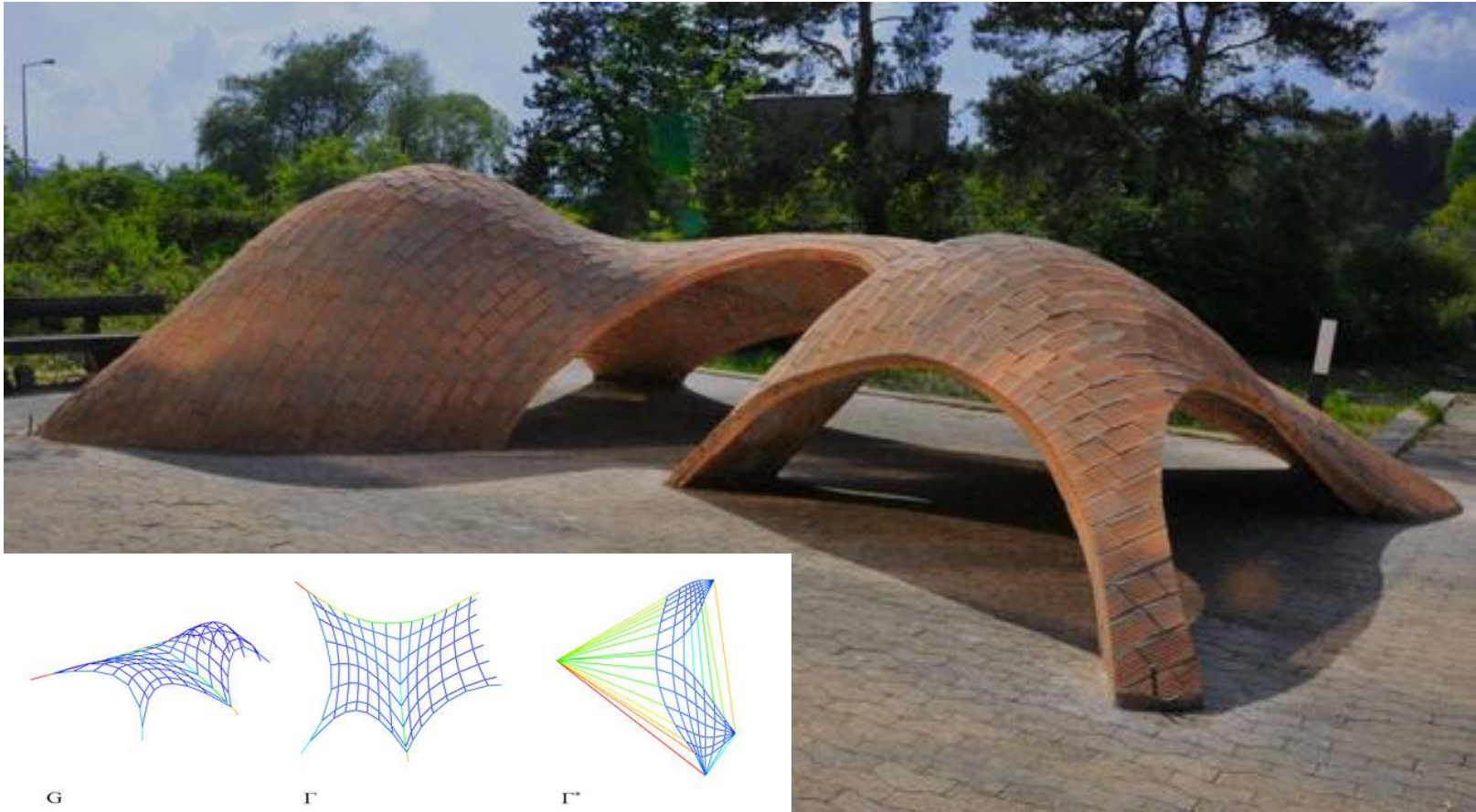




La Villa Janna, le centre de la terre, Marrakech, Denis Coquard

Formfinding en compression pure

- Philippe Block, MIT, ETHZ, rhinovault



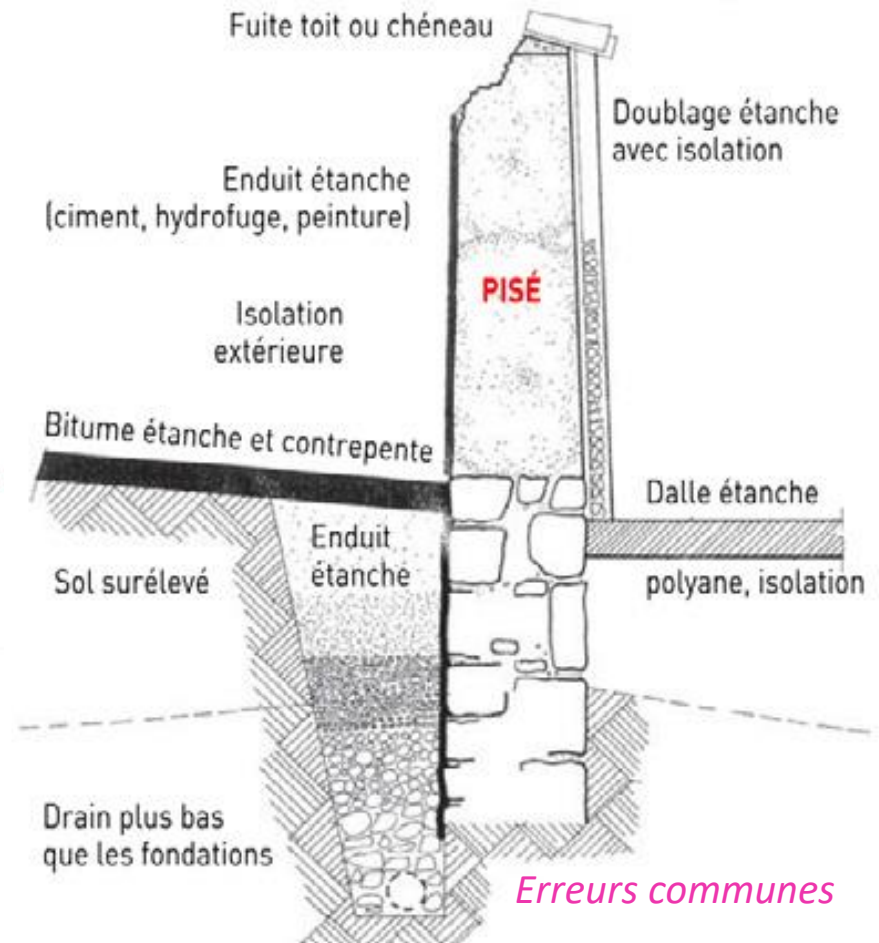
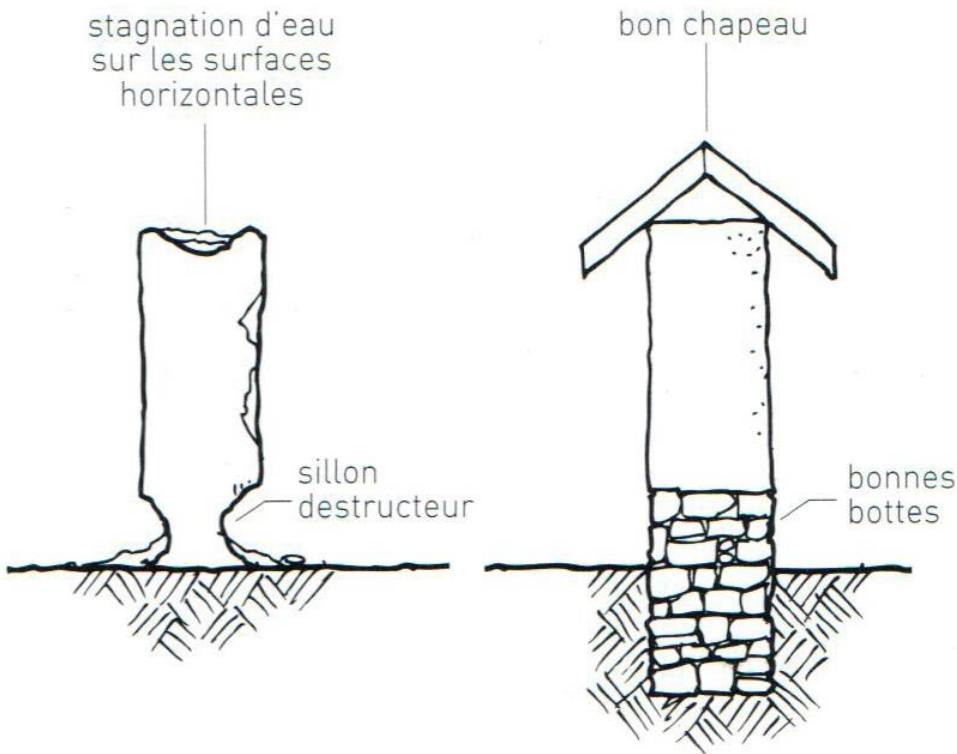


Mapungubwe Interpretation Centre, BTC, Peter Rich Architects, 2010



Pathologies hydriques

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



Comprendre la tradition



Le détail technique

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

1 - méthode constructive / descente de charges

30-300 ans

2 - étanchéité extérieure (eau et vent)

20 ans

3 - isolation thermique

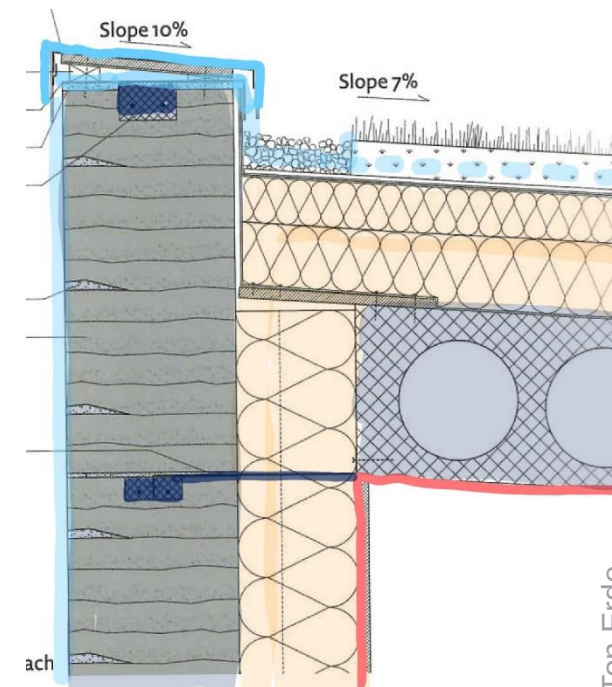
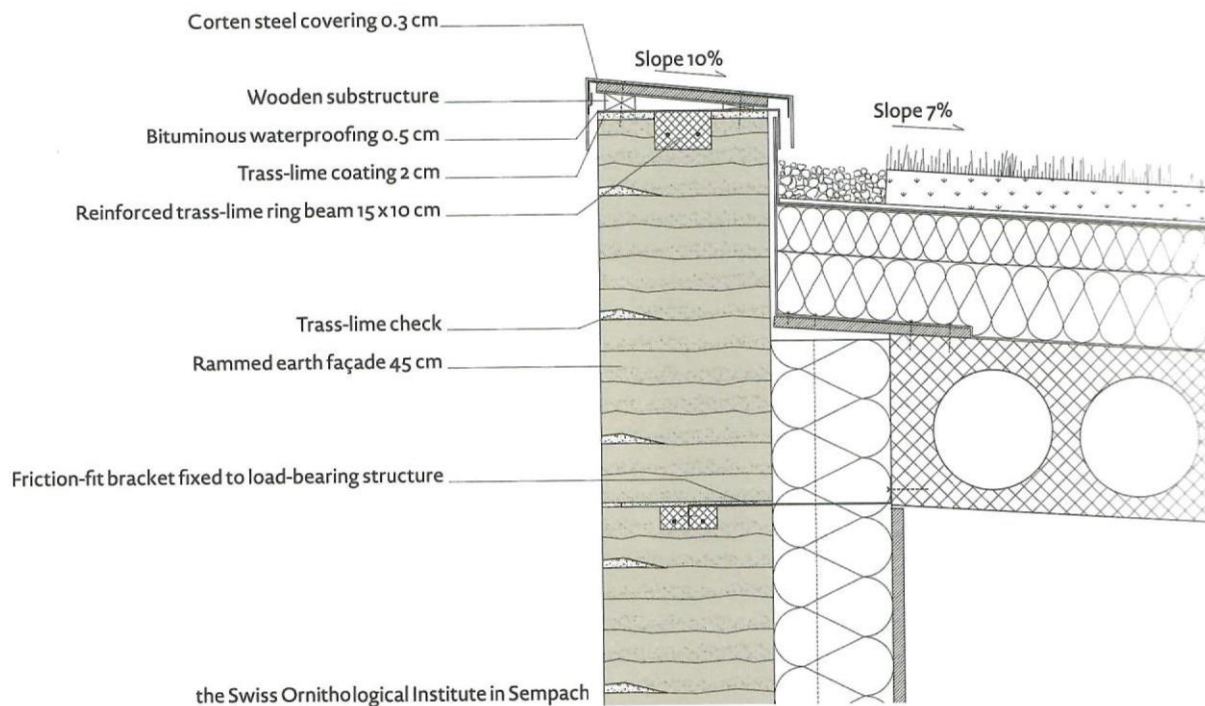
30 ans

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

30 ans

5 - équipement, distribution des fluides

15 ans



L'institut ornithologique suisse

Sempach, Suisse, 2015

:mlzd

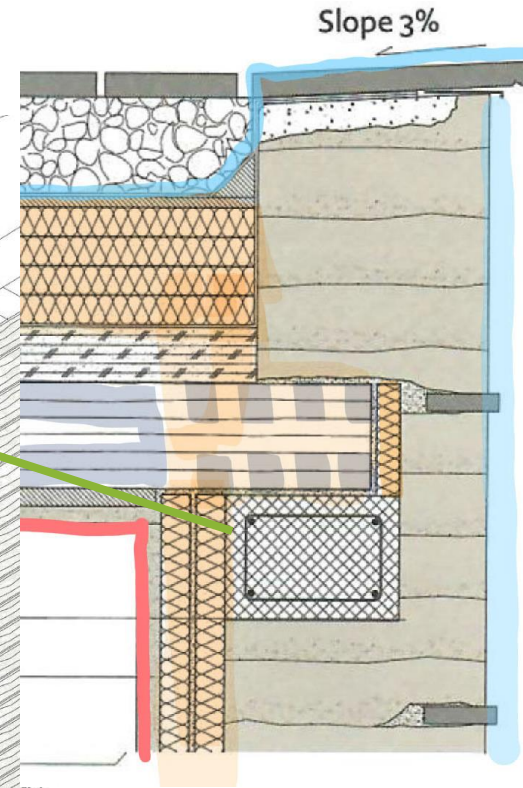
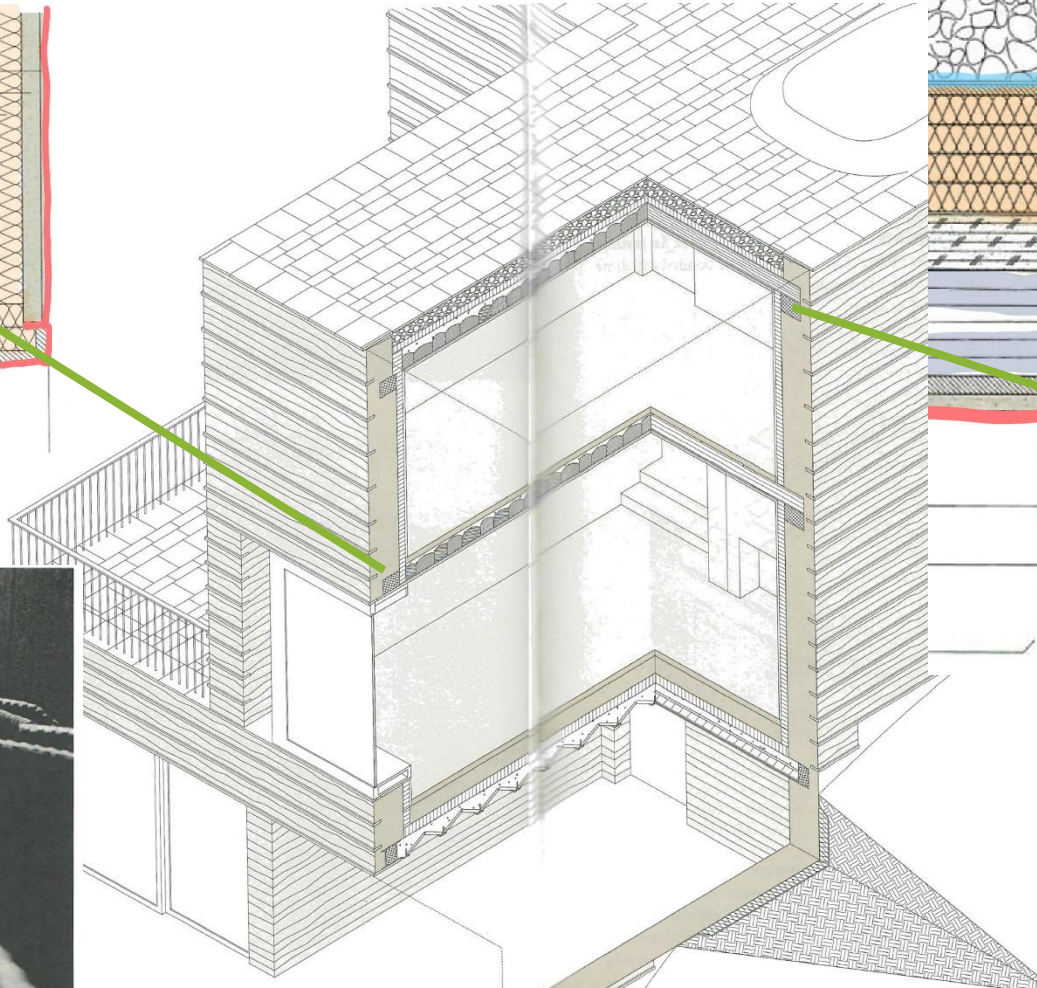
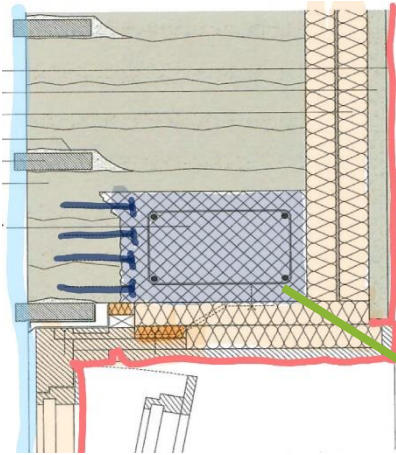




L'institut ornithologique suisse

Sempach, Suisse, 2015
:mlzd

La maison de Martin Rauch



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





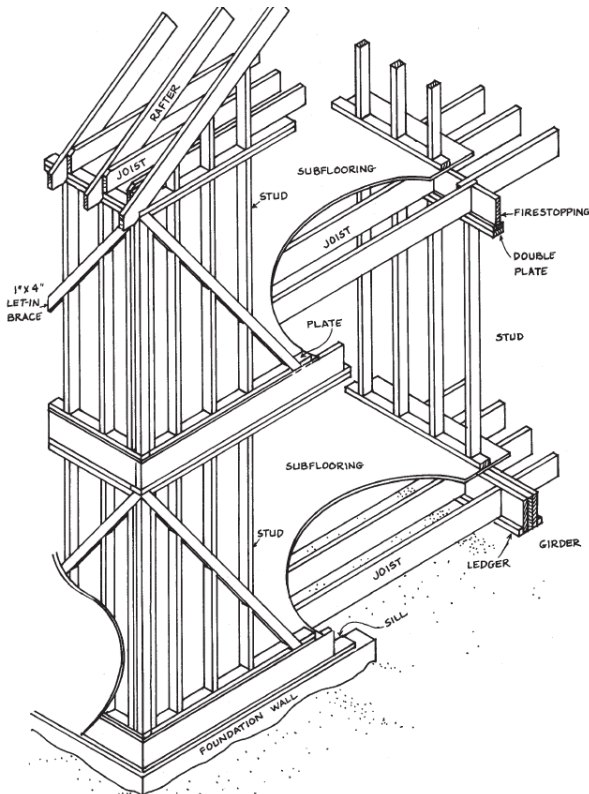
Haus Rauch

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

Proposition idéalisée en terre allégée

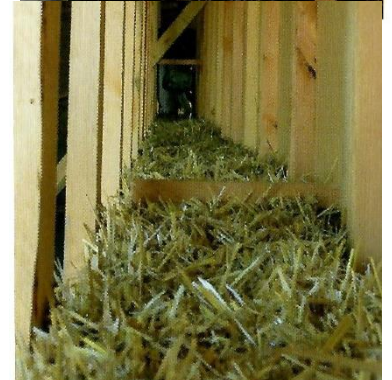
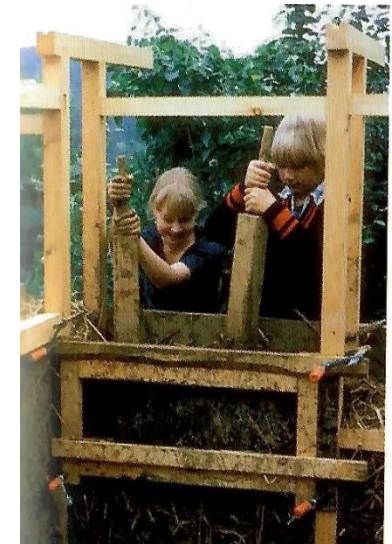
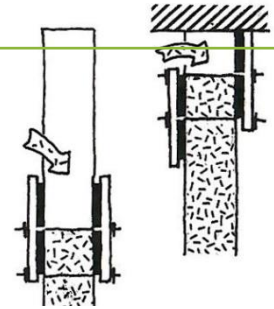
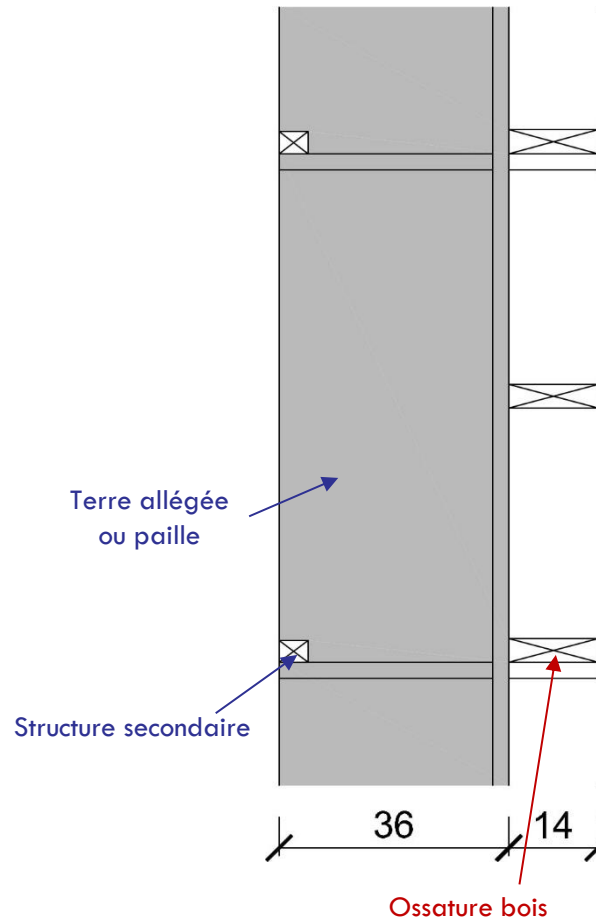
► Phase 1

- Structure porteuse
- Contreventement
- Couverture provisoire



► Phase 2

- isolation



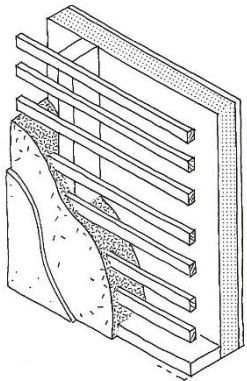
► Phase 3

Extérieur

- Etanchéité à l'eau et au vent

Intérieur

- Techniques



Etanchéité
à l'eau et
au vent

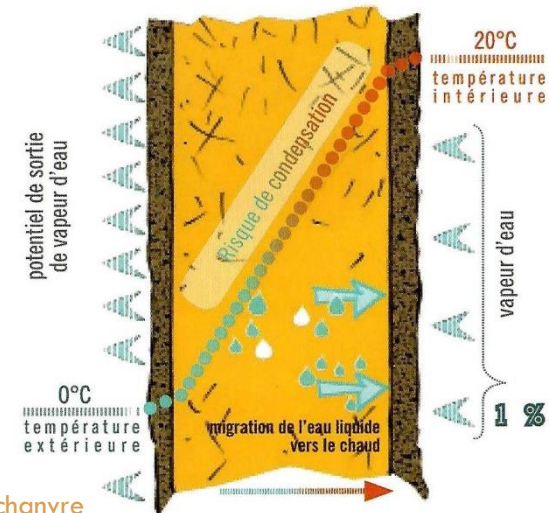
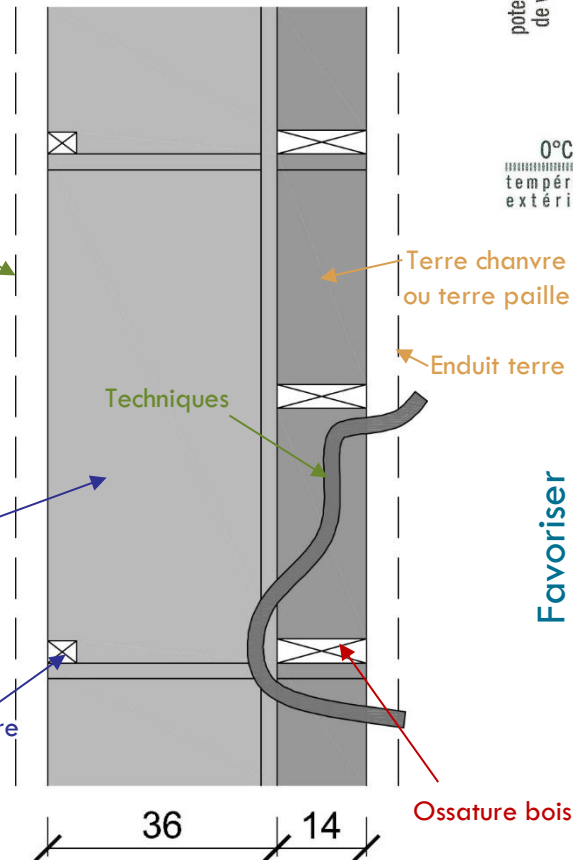
Terre allégée
ou paille

Structure secondaire

Techniques

► Phase 4

- Inertie thermique
- Régulation de la vapeur d'eau



Favoriser
l'évacuation

Ouverture à la
vapeur d'eau

Freiner la
pénétration



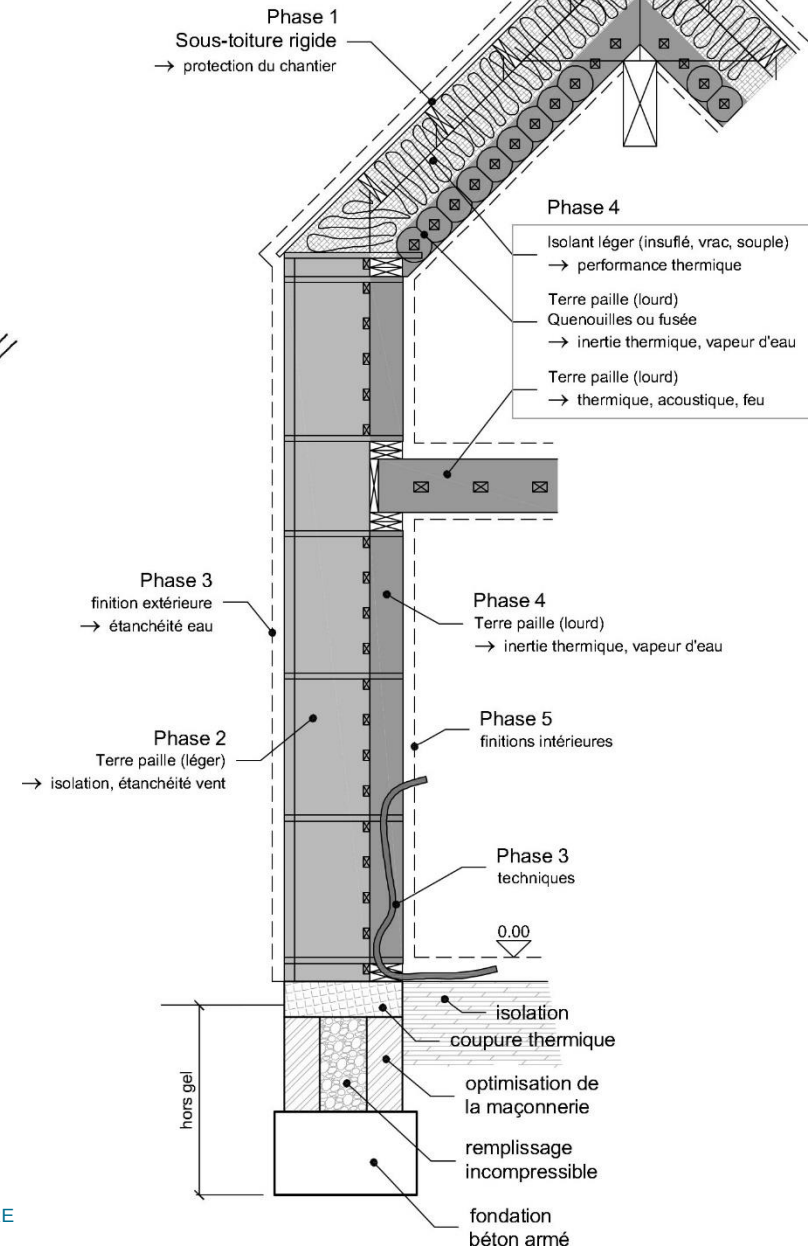
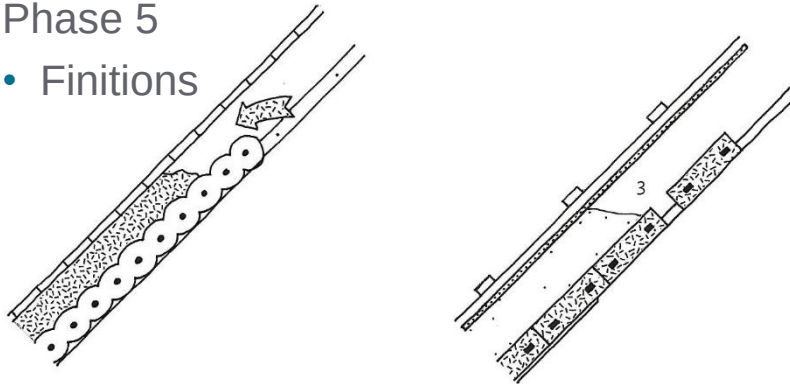
SOBRIÉTÉ STRUCTURELLE

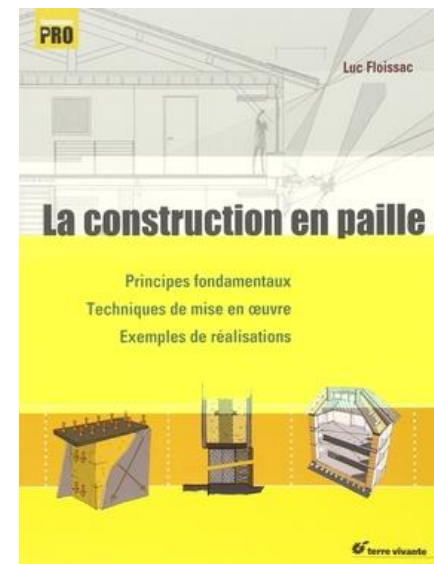
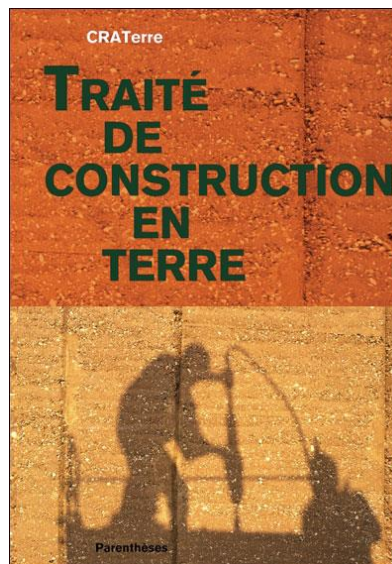
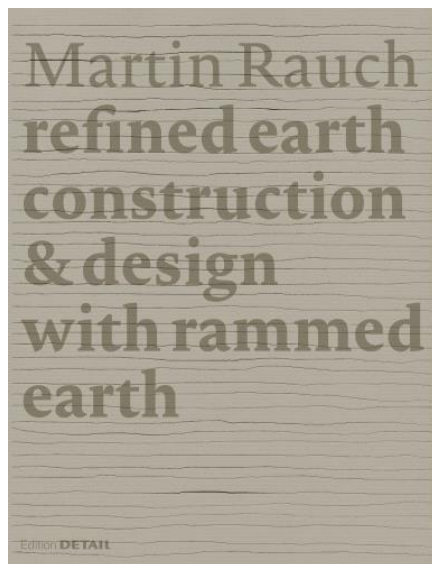
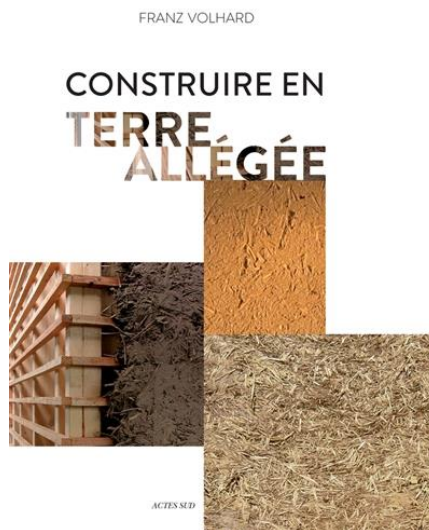
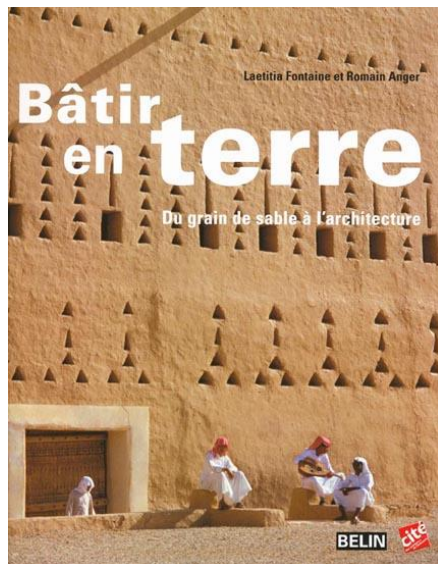
► Phase 4

- Toiture (masse et isolation)
- Plancher (masse)

► Phase 5

- Finitions







La fin de l'abondance matérielle
=
Début de l'abondance des interactions

- ▶ Penser **robustesse** au lieu de performance

L'adaptabilité dans un monde fluctuant

- ▶ La **diversité** de techniques de construction en terre et du matériau nécessite un travail pluridisciplinaire préalable.
- ▶ Il faut **décloisonner** les métiers pour développer un processus de décision et de conception collaboratif
- ▶ **Transmettre** les savoir-faire et vulgariser les connaissances, encore et encore
- ▶ **Innover** dans un contexte social, économique et environnemental fluctuant



Cédric Evrard

Ingénieur structure

Prototype srl

Louvain-la-Neuve

☎ +32 472 20 33 75

✉ cedric.evrard@gmail.com



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

La nécessité est mère de l'invention

Platon (427-348 ACN)

