

Construire en terre : les possibles apports de la chimie

David Gandreau, archéologue et Docteur en architecture, il est Directeur de l'unité de recherche AE&CC, ENSAG-UGA, membre de l'équipe CRAterre. Il est responsable d'une chaire UNESCO autour des développements de bâtiments à base de terre dans différentes régions du monde. Quant à Thierry Joffroy, architecte et chercheur HDR, il est le précédent directeur scientifique de l'équipe CRAterre et de l'Unité de recherche AE&CC, ENSAG-UGA, il est également expert sur les architectures de terre pour l'UNESCO.

1 Introduction

Ce chapitre aborde un matériau ancestral, qui suscite aujourd'hui un intérêt croissant de la part des architectes, des ingénieurs, des urbanistes

et, plus largement, de tous les acteurs impliqués dans l'aménagement des territoires. L'usage de ce matériau est actuellement en expansion, mais il paraît souhaitable que cette progression s'intensifie dans la perspective d'une meilleure contribution aux enjeux globaux d'amélioration des conditions de vie et de développement durable.

1. Organisation des Nations-Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture.

Quelles pourraient être les contributions de la recherche pour favoriser le développement de cette architecture de terre, et plus particulièrement celles de la chimie ? Cette présentation vise à exposer des pistes de réflexion et de nouvelles recherches, mais vous découvrirez tout de même des exemples de ce qui paraît possible à travers ce que je vais partager sur l'architecture traditionnelle.

2 Recherche

La recherche sur l'architecture de terre n'a pas emprunté

les mêmes voies que celle consacrée aux autres matériaux plus couramment étudiés. Pourtant, des avancées remarquables ont vu le jour, portées par des architectes pionniers qui ont relancé cette discipline. Leurs travaux, à la fois scientifiques, systématiques et expérimentaux, se sont souvent appuyés sur des prototypes. Parmi ces figures emblématiques, l'architecte égyptien Hassan Fathy (*Figure 1*) fait figure de précurseur. Après les deux guerres mondiales, il a joué un rôle clé dans le renouveau de l'architecture de terre, notamment à

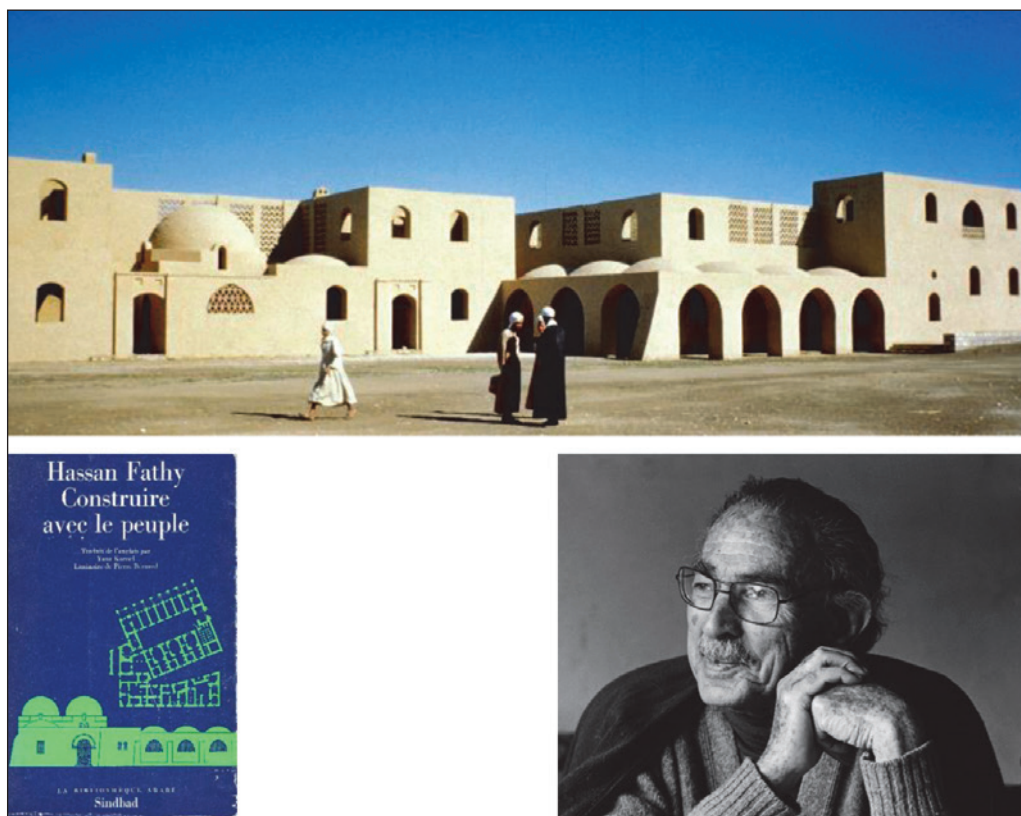


Figure 1

Construction du village de New Gurna, à Louxor (1946-1953). © Aga Khan Trust for Culture / Christopher Little. Ouvrage et photo d'Hassan Fathy (1900-1989).

travers son ouvrage fondateur « *Construire avec le peuple* », où il montre comment il a réutilisé dans sa pratique professionnelle les enseignements tirés de l'architecture traditionnelle égyptienne.

Son objectif était de proposer une alternative au modèle dominant issu de la globalisation et donc de la standardisation de l'architecture, en promouvant des architectures réellement ancrées dans leur contexte, et en réhabilitant l'idée du *génie du lieu*². Hassan Fathy incarnait pleinement cette vision.

Il est important de souligner l'existence du village de New Gourna, près de Louxor³, qui a joué un rôle majeur dans l'histoire de l'architecture de terre. Il a été déterminant pour le laboratoire CRAterre.

La rencontre de ses fondateurs avec Hassan Fathy en Égypte a marqué un tournant. Ces jeunes architectes, devenus ensuite enseignants à Grenoble, ont saisi cette idée pour développer des recherches plus systématiques et pluridisciplinaires. Rapidement, des ingénieurs et des sociologues les ont rejoints. En 1979, un premier ouvrage, « *Construire en terre* », a été publié et a depuis été traduit dans plusieurs langues (*Figure 2*). Partant d'une poignée de fondateurs, CRAterre, initialement une association, est devenu un laboratoire de recherche en 1986, les deux

structures cohabitant toujours, permettant des aller-retours nombreux et fructueux entre recherche et pratique de terrain. Aujourd'hui, il rassemble environ 80 chercheurs et chercheurs associés dont une bonne partie est amenée à travailler à l'international, un peu partout dans le monde.

Au cours du temps, la recherche s'est intensifiée, et heureusement pas seulement à Grenoble : c'est désormais un peu partout dans le monde que de plus en plus de laboratoires et d'équipes de recherche, y compris d'écoles d'ingénieurs qui s'intéressent à ce matériau aux multiples qualités, naturel, écoresponsable et durable. Aujourd'hui, les avancées sont significatives, et j'espère qu'elles nous permettront, d'ici le prochain congrès *Chimie et Habitat* dans une dizaine d'années, de vous présenter de nouveaux résultats concrets issus de nouvelles collaborations à venir.

Je peux notamment évoquer la mise en réseau de ces acteurs grâce à une chaire UNESCO (*Figure 3*), portée par l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (Université de Grenoble-Alpes- UGA) dont je suis le responsable scientifique. Créée en 1998 – donc d'une durée exceptionnelle pour une chaire UNESCO –, elle favorise, sur le long terme, les échanges entre chercheurs et facilite une variété d'approches et leur mise en complémentarité. Son objectif est de diffuser les savoirs et les pratiques, non plus à une échelle locale ou régionale, mais bien mondiale. Elle fédère aujourd'hui 34 institutions partenaires dans 25 pays.

2. Esprit ou identité particulière d'un lieu, liée à son histoire, son environnement, sa culture et à la façon dont les humains y vivent.

3. Ville d'Égypte située sur la berge ouest du Nil en face de Louqsor

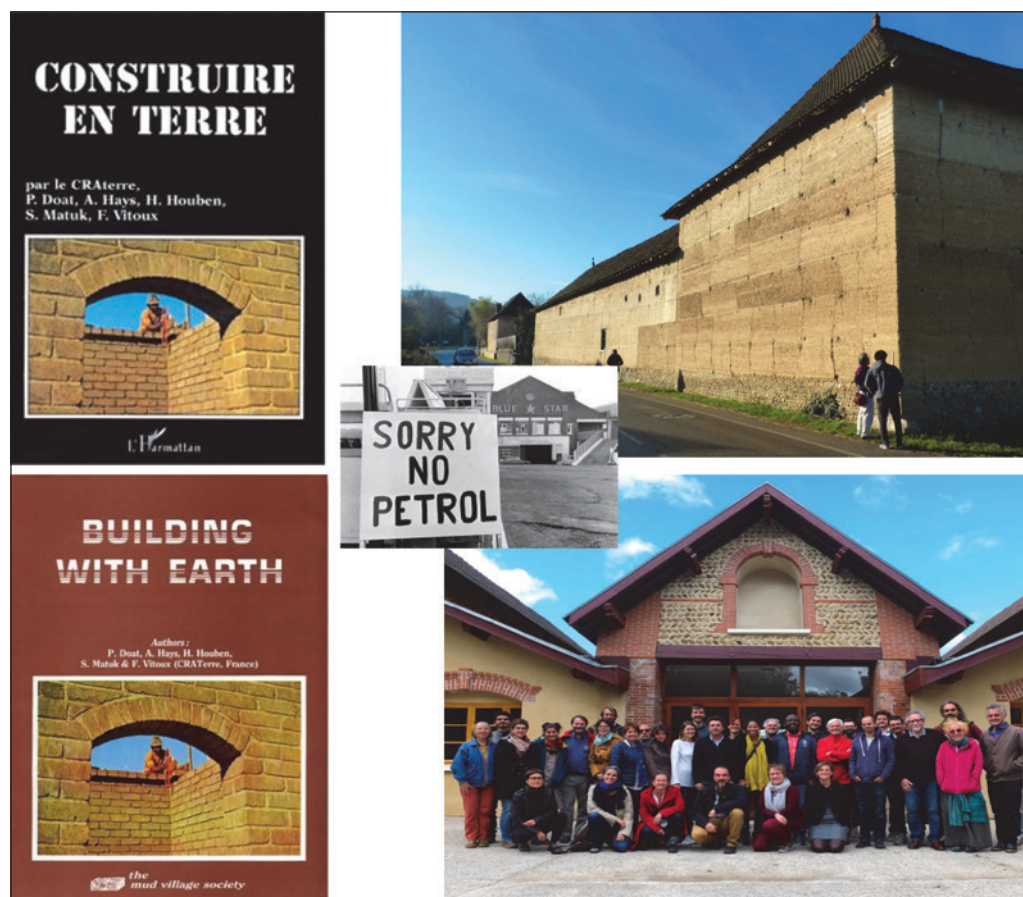


Figure 2

Ouvrage « Construire en terre », dont la traduction anglaise est « Building in earth ». © Sébastien Moriset. Centre international de la construction en terre, CRAterre (1979 / 1986).

3 Enseignements

Pour bien comprendre, revenons aux années 1980. À cette époque, la terre comme matériau était totalement dévalorisée, injustement méprisée, alors que le béton – que l'on a qualifié plus tôt de « pierre magique » – s'imposait comme la solution moderne, reléguant les matériaux locaux, souvent associés à l'habitat rural et à des zones en déclin. Pourtant, cette perception était

erronée. Un inventaire a été réalisé, comme en témoigne cette carte mondiale des architectures en terre. Quand « Construire en terre » a été publié en 1979, on estimait qu'un tiers de la population mondiale vivait dans des habitats en terre. Aujourd'hui, je ne pense pas que cette proportion soit la même (Figure 4), mais la terre reste un matériau de construction majeur qui mérite une attention particulière, notamment au vu des grands enjeux globaux actuels.

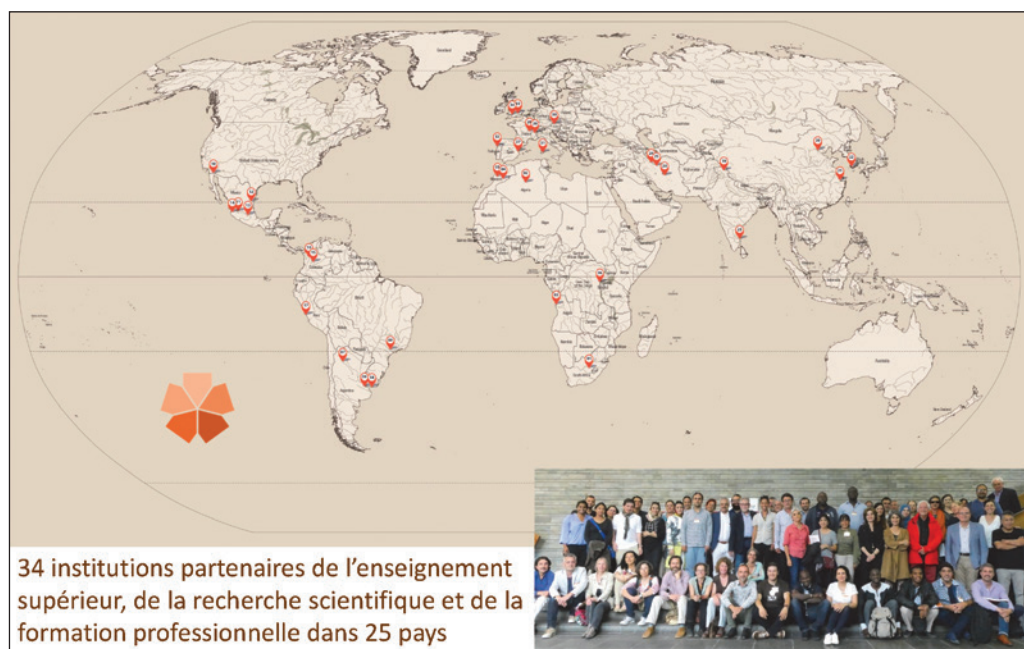


Figure 3

Carte représentant les différentes institutions de la chaire de l'UNESCO « Architectures de terre, cultures constructives et développement durable ».

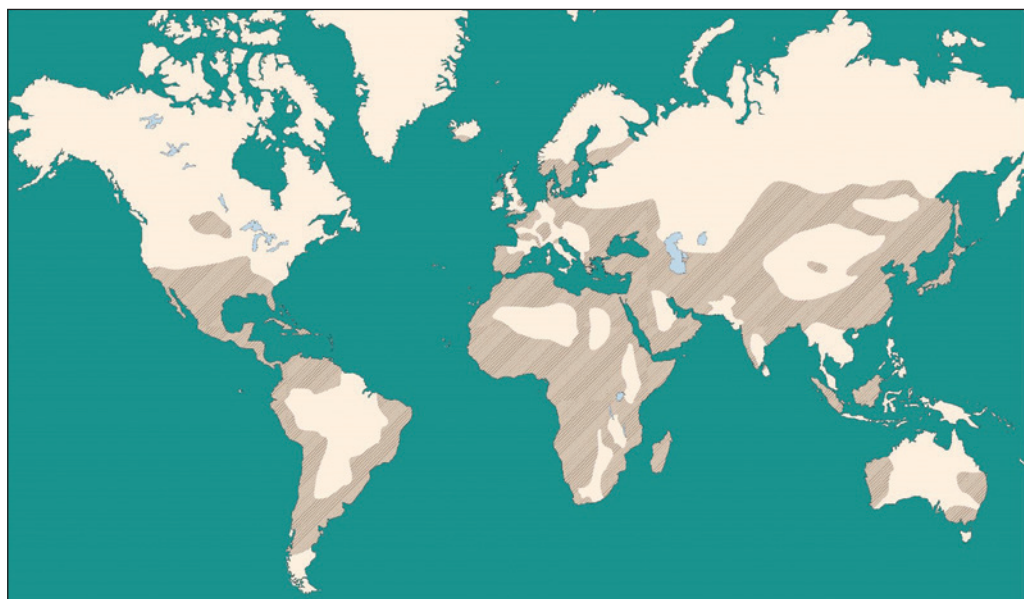


Figure 4

Répartition des architectures en terre crue dans le monde.

3.1. Importance dans l'histoire de l'architecture en terre

Les mentalités ont profondément évolué ces cinquante dernières années, mais les architectures en terre restent bien plus présentes qu'on ne l'imagine. On redécouvre même des constructions en terre dans des endroits inattendus. Prenons l'exemple de Lyon : un inventaire récent a révélé l'existence de quartiers entiers, notamment à Croix-Rousse, ainsi que sur la rive droite du Rhône et la rive gauche de la Saône, où des immeubles, certains allant jusqu'à sept étages, sont en partie construits en pisé, témoignant de l'usage persistant de ce matériau. Nous reviendrons plus tard sur la technique du pisé, qui est celle principale de l'architecture de la Région Auvergne Rhône Alpes.

Deux constats s'imposent : d'abord, cette architecture

est toujours largement répandue ; ensuite, elle remonte aux débuts de la sédentarisation, dès le Néolithique, il y a plus de 11 000 ans. Les archéologues, qui l'avaient longtemps négligée, plus intéressés par les vestiges en pierre ou en briques cuites, lui accordent aujourd'hui une meilleure attention et reconnaissent son rôle fondamental dans le développement des sociétés anciennes.

La **figure 5** illustre les vestiges d'un mur à El Mughara, en Syrie, où l'on observe des architectures en terre déjà ornées et peintes il y a plus de 11 000 ans.

On constate que la maîtrise de la terre comme matériau de construction a été progressive et ce depuis très longtemps. En fait, dès l'âge du Bronze⁴, les connaissances en construction en terre étaient déjà remarquablement avancées.

Aujourd'hui, il serait même assez difficile de reproduire ces briques de terre crue avec la même précision et le même savoir-faire que ceux observés sur les vestiges conservés (**Figure 6**). En tant que spécialiste de la conservation de ces vestiges, je peux affirmer que leur fabrication faisait appel à un processus déjà complexe et amenant à une qualité remarquable, difficile à restituer.

Au-delà, c'est bien ce matériau terre, et notamment la brique de terre (adobe) qui a permis le développement de l'habitat à grande échelle et les premières formes d'urbanisation, il y a plusieurs milliers d'années, comme en attestent



Figure 5

Vestige d'un mur décoré à El Mughara, en Syrie. © Mission Archéologique de Dja'De, MAEDI/E. Coqueugniot.

4. Entre -3 000 à -1 200 av. J.-C.

de nombreux exemples d'établissements humains déjà très denses à ces époques (*Figure 7*).

La durabilité de ces constructions est frappante : certaines, comme le site archéologique de Çatalhöyük, datent de 7 000 ans et, au-delà d'une technique élaborée de construction et de savoirs d'organisation et de planification, illustrent déjà des principes de bioconception⁵ remarquables.

Le long du Tigre et de l'Euphrate, de nombreuses villes

5. Méthode de conception qui consiste à créer des objets, des bâtiments ou des produits en s'inspirant du vivant et en limitant leur impact sur l'environnement.



Figure 6

Mur en briques de terre de l'âge du Bronze, témoin d'un savoir-faire exceptionnel. © Mission Mishrifeh-Qatna (Syrie centrale)/G. Mouamar.



Figure 7

Site archéologique de Çatalhöyük, Fondation VIII Mill. B.C. (Turquie), © Çatalhöyük Research Project (<https://www.catalhoyuk.com/>).

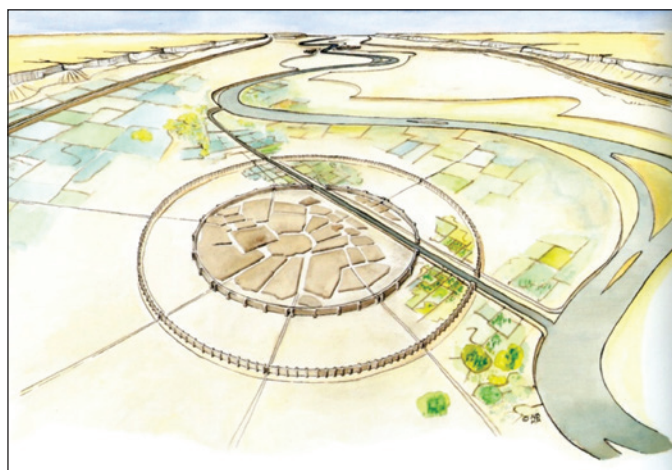


Figure 8

La cité antique de Mari, exemple de ville construite en terre.
Fondation III-II Mill. B.C. (Syrie), © J.C. Margueron, N. Bresch
(<https://archeologie.culture.gouv.fr/mari/fr/ville-ii-0>).

ont été édifiées presque exclusivement en terre. Leurs concepteurs avaient développé des savoir-faire ingénieux pour exploiter l'eau des fleuves – essentielle à la préparation des mélanges de terre – tout en évitant les remontées

capillaires et les dégradations liées à l'humidité au pied des murs.

Ces solutions, aujourd'hui réétudiées, inspirent une architecture de terre contemporaine qui s'appuie sur ce patrimoine de connaissances. La **figure 9** résume cette évolution à travers une frise chronologique simplifiée.

L'enjeu est clair : après 11 000 ans d'architecture de terre, marquée par des transmissions de savoirs sophistiqués, la période d'après-guerre (39-45) a introduit une rupture, privilégiant des matériaux jugés plus performants, issus d'un monde industriel largement favorisé lors de la période de conflit.

3.2. Diversité des architectures

Mais quelques années plus tard, un tournant majeur a été marqué par l'attention portée par l'UNESCO à ce patrimoine



Figure 9

Frise chronologique de l'évolution des constructions en terre à travers les âges. Source : Exposition archéoTERRA, Musée Gallo-Romain de Lyon, 2016.

en terre. Dans le cadre de la convention de 1972, et grâce aux efforts de nombreux États parties à cette convention, le *Comité du patrimoine mondial* a régulièrement inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'humanité de nombreux sites exceptionnels construits en terre (**Figure 10**).

Actuellement, sur les plus de 1200 sites classés au patrimoine mondial plus de 200 sont entièrement ou partiellement construits en terre (**Figure 11**).

Face à cette réalité, l'UNESCO a mis en place un programme spécifique, le *World Heritage Earthen Architecture Programme*⁶ (WHEAP). Son

objectif est d'assurer une conservation et une gestion adaptées de ces sites, en tenant compte des particularités mêmes du matériau terre.

L'observation de la nature de cette liste nous révèle une grande leçon : l'architecture de terre se distingue par une diversité remarquable. Là où l'architecture moderne tend à s'uniformiser au niveau global, la terre incarne au contraire le *génie du lieu*, offrant une richesse de formes et de techniques uniques à chaque contexte : un hymne à la diversité culturelle.

Prenons quelques exemples marquants.

Commençons par le Yémen, dans la vallée de l'Hadramaout, où se dresse la ville de Shibam.

6. Programme du patrimoine mondial pour l'architecture en terre.

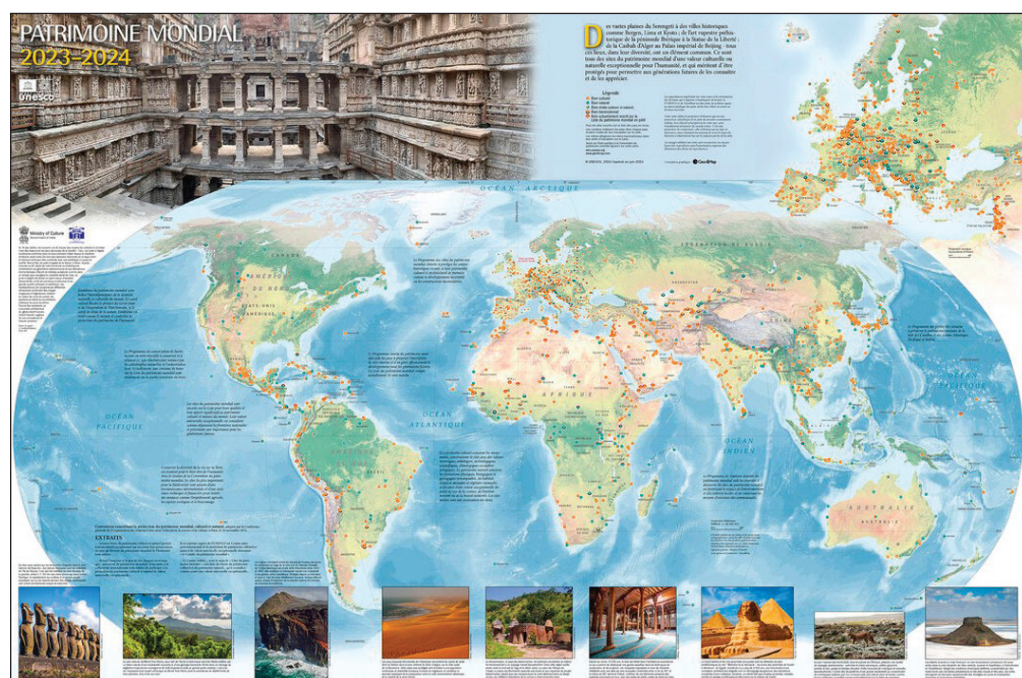


Figure 10

Carte mondiale des sites inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO en 2023-2024.

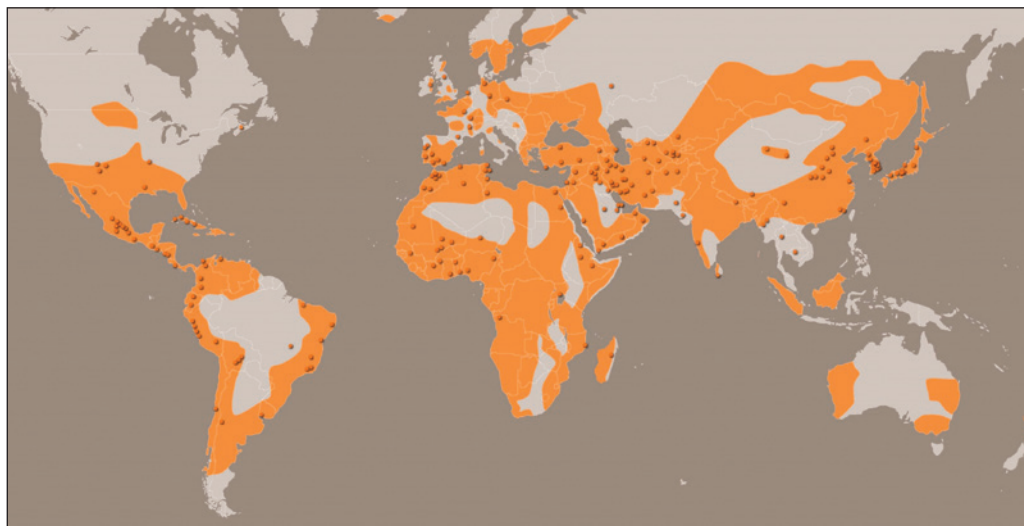


Figure 11

Sites du patrimoine mondial de l'UNESCO construits entièrement ou partiellement en terre. Juillet 2021 : 203 biens en terre.



Figure 12

Illustration de la diversité des architectures de terre.

Son tissu urbain, datant des xv^e – xvi^e siècles (voire plus tôt), est toujours habité grâce à une transmission ininterrompue des savoir-faire et à un entretien constant des bâtiments. Cette cité, extrêmement dense, compte des immeubles de 8 à 10 étages, ce qui lui vaut le surnom de *Manhattan du désert* (**Figure 13**).

Autre exemple : la ville-oasis de Ghadamès, en Libye (**Figure 14**), chef-d'œuvre d'architecture et d'urbanisme bioclimatique. Elle offre un confort toute l'année, malgré des températures dépassant souvent 45 °C aux portes du désert. Ce site regorge de précieuses connaissances architecturales. La terre, matériau souple, y révèle aussi une esthétique unique, inspirant aujourd'hui les architectes par ses formes et ses lignes originales.

On peut aussi citer la Grande Mosquée de Djenné au Mali, symbole de créativité architecturale et de symbiose entre l'architecture et la population locale qui participe régulièrement à son entretien (**Figure 15**).

La Grande Muraille de Chine, souvent imaginée en pierre, est en réalité partiellement construite en terre, là où la présence de ce matériau le permettait voire l'imposait. Des tronçons entiers en témoignent (**Figures 16 et 17**).

Contrairement aux idées reçues, la terre n'est pas réservée à l'architecture rurale. Elle a aussi permis la construction de pyramides, comme celle de Tchoga-Zanbil en Iran (**Figure 18**), de 100 mètres de côté, édifiée en briques de terre crue et



Figure 13

Vue générale de Shibam, Hadramaut (Yémen). © R. Crassard.



Figure 14

La ville de Ghadamès en Libye est composée de 1300 maisons de deux à trois étages étonnamment imbriquées les unes dans les autres.

recouverte de briques cuites. Une conception architecturale d'une grande ingéniosité.

Ces constructions pyramidales en terre sont nombreuses. Celle-ci, appelée ziggourat⁷,

7. Grand temple en forme de pyramide à étages, construit dans la Mésopotamie antique pour des rites religieux.



Figure 15

La grande mosquée de Djenné (Mali) © CRAterre/T. Joffroy.

n'est qu'un exemple parmi d'autres : on en trouve aussi le long de la vallée du Nil, où des pyramides en terre, moins connues, sont pourtant bien présentes. La pyramide noire, à Dahchour, qui, haute de 75 mètres est même fort probablement l'édifice en terre jamais construit à travers le monde.

Le matériau se prête même à la sculpture de bas-reliefs, comme en témoigne l'exemple de la **figure 19**, le site de Chan Chan au Pérou (Amérique latine) En de nombreux endroits du monde, la terre,



Figures 16 et 17

Portions de la Grande muraille de Chine construites en terre.



Figure 18

Ziggourat de Tchoga-Zanbil (Iran). © CRAterre/H. Guillaud.

de par sa plasticité, permet de modeler des récits visuels qui immortalisent l'histoire des sociétés qui l'ont utilisée.

3.3. Techniques

Ces exemples illustrent la diversité des constructions en terre, mais il est tout aussi important de connaître la variété des techniques de construction associées. Je vais vous présenter brièvement les quatre principales, schématisées ici.

La première est la bauge (**Figure 20**) : on prépare un mélange de terre que l'on façonne en boules, puis on les assemble directement sur le mur, comme on modelerait un vase en argile. Cette technique, l'une des plus anciennes, remonte aux débuts de la sédentarisation. Elle permet de réaliser des murs porteurs, parfois avec plusieurs étages, offrant ainsi une grande hauteur.

La deuxième technique, bien connue, est le torchis (**Figure 21**). Très répandue dans le nord-ouest et l'est de la France, elle consiste à ériger une ossature porteuse en bois, que l'on remplit ensuite



Figure 19

Bas-relief en terre sur le site archéologique de Chan Chan (Pérou).
© CRAterre/H. Guillaud.

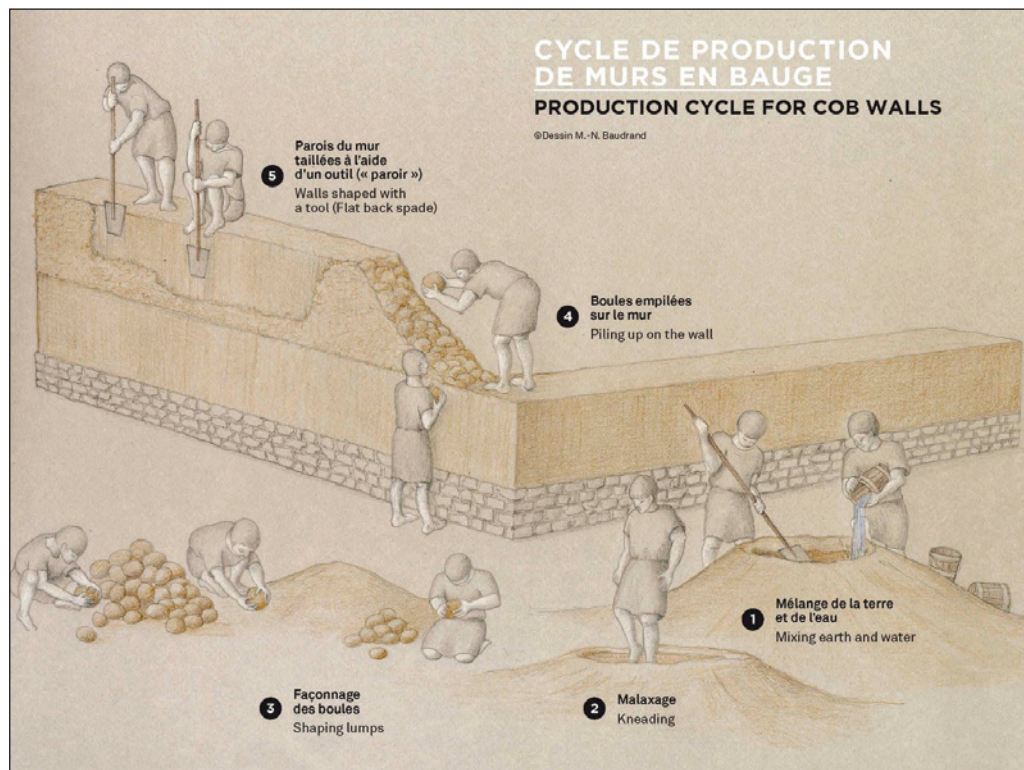


Figure 20

Cycle de production de murs en bauge.

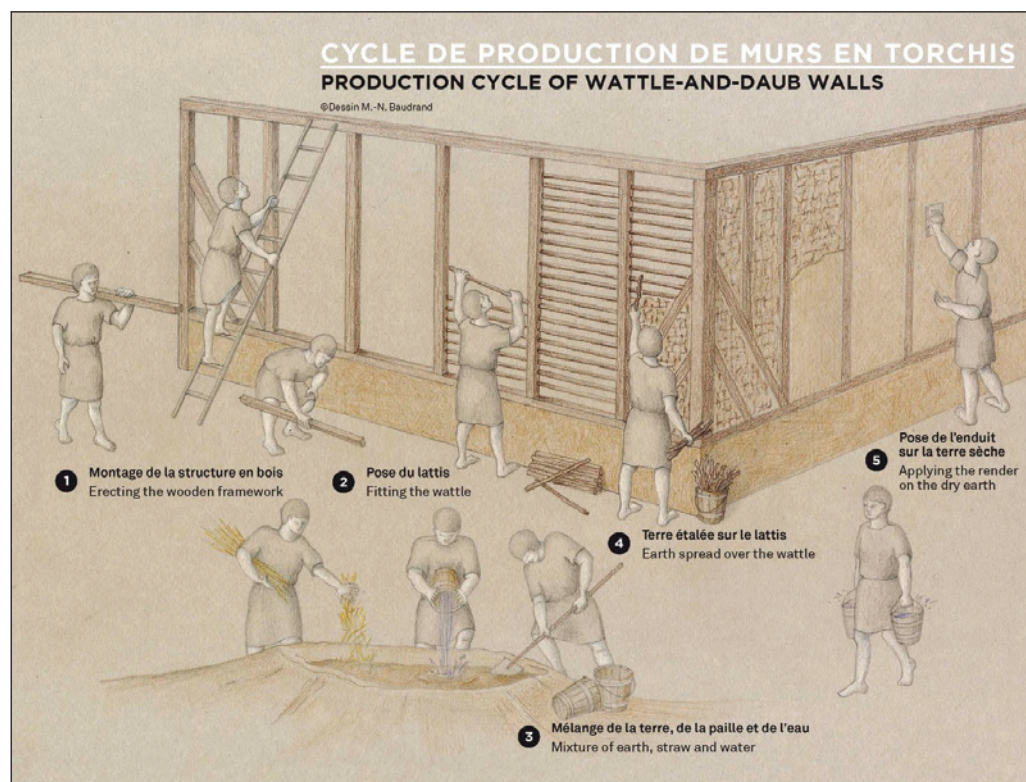


Figure 21

Cycle de production de murs en torchis.

avec un mélange de terre préparé sur place.

Ensuite, il y a la technique de la brique de terre crue (**Figure 22**). Son originalité réside dans le fait qu'elle permet de produire un matériau préfabriqué, modulaire et prêt à l'emploi, comme le montre cette représentation où aucun édifice n'apparaît.

Cette méthode sépare la production du matériau de sa mise en œuvre architecturale. C'est une approche à caractère d'industrie qui a favorisé le développement à grande échelle de l'architecture de terre, notamment lors des premières révolutions urbaines, comme celles du *Croissant fertile*, le

long du Tigre et de l'Euphrate, ou encore autour de l'Indus et au Pakistan. Il est essentiel de retenir que la brique de terre crue représente le premier matériau ayant un caractère industriel, et dont le développement de l'usage aura un impact considérable sur le développement de villes à travers le monde, et ce autant sinon encore plus important que celui de la brique cuite, plus connue.

Enfin, une technique très connue en France et qui d'ailleurs est à l'origine de la création de CRAtterre : le pisé. Apparue près de 6 000 ans après les premières méthodes déjà citées, cette technique

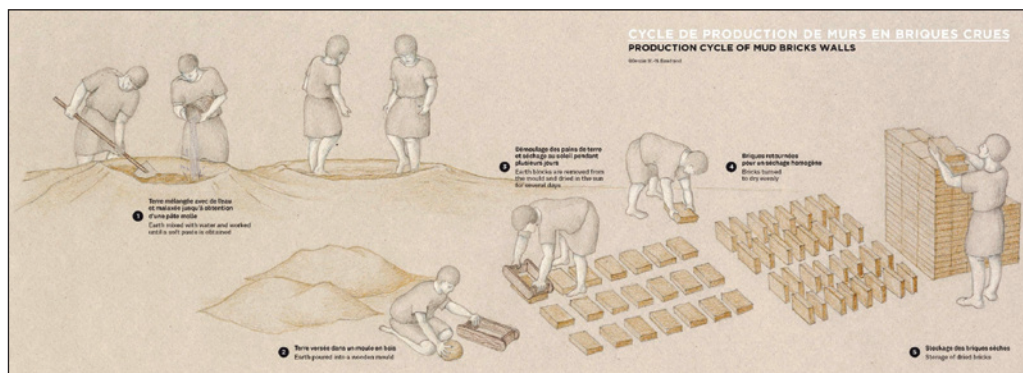


Figure 22

Cycle de production de murs en brique crue.

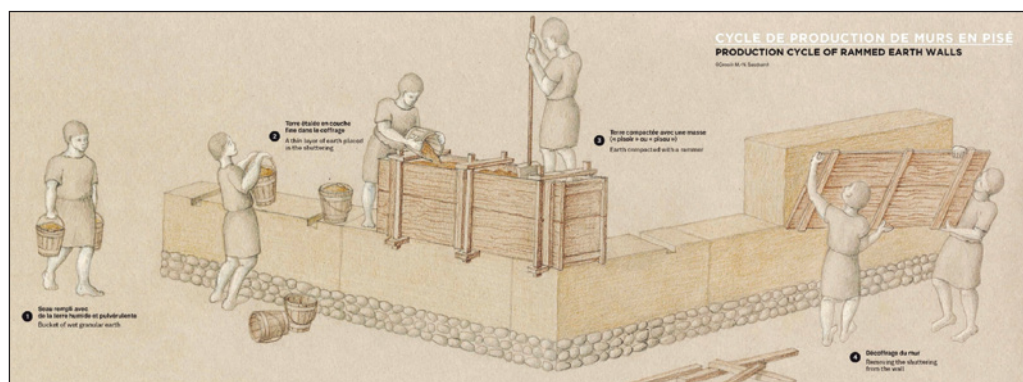


Figure 23

Cycle de production de murs en pisé.

s'apparente au béton. La terre est compactée dans des banches, avec un minimum d'eau, afin d'éviter un phénomène redouté : le retrait lors de l'évaporation (**Figure 23**). C'est cette technique évoquée plus tôt à propos de Lyon, qui a été en grande partie construite selon cette technique, notamment au cours des 18 et 19^e siècles.

La diversité des techniques est donc immense. Au-delà des quatre présentées, la recherche en identifie aujourd'hui au moins douze,

comme le montre cette « roue » des techniques, toujours en évolution (**Figure 24**). Travailler sur la construction en terre, c'est d'emblée intégrer cette diversité des mises en œuvre dans ses approches, ses questionnements et ses méthodologies.

4 La matière en grains : propriétés physiques

Tout comme le ciment se compose de granulats et de liant, les méthodes de construction en terre reposent sur une variété

Figure 24

Roue des techniques de construction en terre.
©CRAterre. (Fontaine et Anger 2011 : 22, sur la base de Houben et Guillaud 1989 : 15).

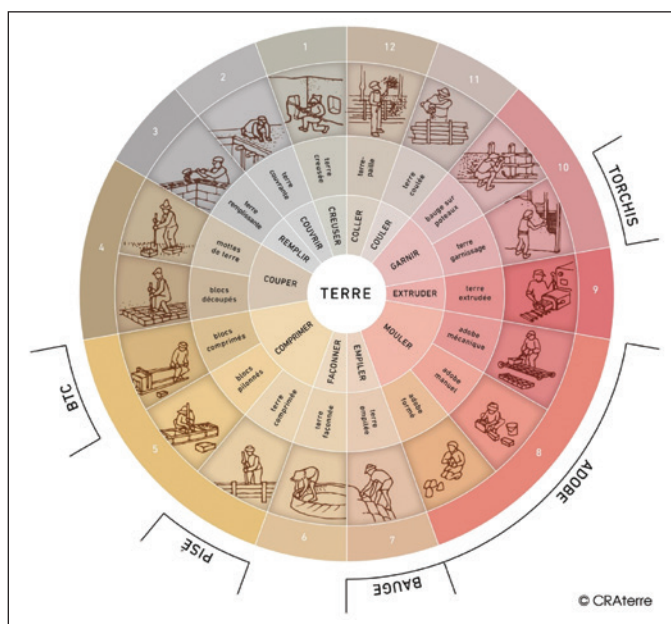


Figure 25

Illustration de la variété de taille des grains potentiellement présents dans une terre.

de grains bien plus étendue que celle du béton, pour lequel on cherche généralement à uniformiser les tailles.

Ici, cette diversité devient une force. On l'évalue grâce à des courbes granulométriques (**Figure 26**), obtenues en tamisant les grains – du caillou au gravier, en passant par le sable, les silts⁸, et jusqu'aux argiles, dont on analyse les propriétés par sédimentation et examens complémentaires.

La granulométrie est la caractéristique la plus étudiée à ce jour. Elle permet de (re) formuler des terres sur mesure, en ajustant la composition par tamisage ou ajout de sable, par exemple. En compactant, comme pour le pisé, on obtient une construction en terre optimisée, aux propriétés physiques maîtrisées.

Cette approche a connu un essor remarquable, notamment dans le Nord-Isère, où le

8. Limons : particules de terre très fines, plus grosses que l'argile mais plus petites que le sable.

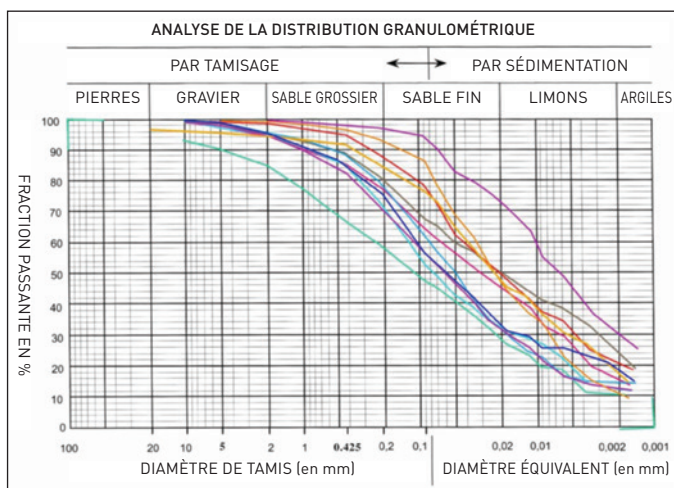


Figure 26

Exemple de courbes granulométriques.

pisé est désormais utilisé pour des réalisations audacieuses. À Lyon, un projet récent pousse l'innovation jusqu'au pisé préfabriqué, avec des formes architecturales marquées par de grandes arches (**Figure 29**).

L'habitat individuel n'est pas en reste : cette maison en Espagne, primée lors d'un concours international



Figure 27 et 28

Photos de la construction d'un bâtiment communal à Four, en France, construit avec une formulation de terre de granulométrie précise.



Figure 29

L'orangerie, immeuble de bureaux de 9 000 m² bâti en pisé préfabriqué à Lyon (presqu'île) en 2020-2021.

d'architecture de terre, en est un exemple (Figure 30).

Enfin, les travaux de l'architecte chinois Jun Mu illustrent le renouveau du pisé à très grande échelle, notamment dans les provinces chinoises, comme en témoigne ce bâtiment emblématique (Figure 31).

Cette technique se redéveloppe aujourd'hui à un rythme soutenu.



Figure 30

Maison en pisé en Espagne.

5 Les stabilisants naturels : propriétés chimiques

Un domaine reste étrangement peu exploré dans la recherche sur l'architecture de terre : l'étude des stabilisants naturels. Pourtant, leur utilisation est ancestrale, comme le montrent les méthodes traditionnelles de préparation des mélanges. Pourquoi un malaxage aussi prolongé ? Pourquoi laisser la terre reposer, macérer – certains diront même fermenter – pendant des périodes si longues ?

Ces questions reviennent souvent : ici, on incorpore des fibres ; là, on ajoute de la paille. Pendant des années, on a pensé que ces ajouts servaient uniquement à renforcer les propriétés mécaniques – limiter le retrait en retenant la terre, par exemple.

Aujourd'hui, on découvre que ces mélanges avec des adjuvants naturels⁹ ne se limitent pas à des avantages mécaniques. Ils visent surtout à produire un matériau prometteur, en plein essor : la brique de terre crue, aussi appelée *adobe*.

Sur le terrain, ceux qui perpétuent ces savoir-faire accordent une attention particulière à la préparation du mélange et à son temps de macération. Cette tradition s'inscrit souvent dans un processus socialement très structuré. La mosquée de Djenné (Figure 36) en est un exemple emblématique : son

9. Substances d'origine naturelle ajoutées à un matériau pour améliorer ses propriétés, comme la solidité ou la résistance à l'eau.

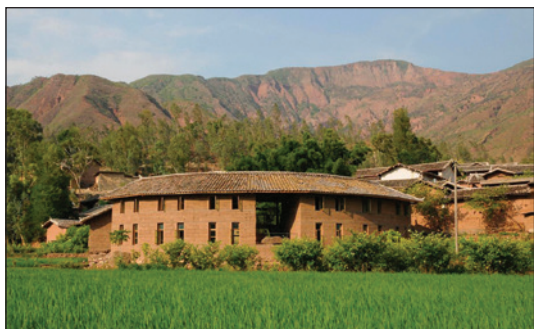


Figure 31

Ministère du logement et du développement rural de Chine, par l'architecte Jun Mu.



Figure 32

Malaxage de la terre par des animaux. Courtesy : LafargeHolcim Foundation & Roswag Architekten.



Figure 33

Personne piétinant de la terre et de la paille pour créer de la terre à bâtir. © B. Clément.



Figure 34

Reconstruction d'une cloison en torchis.
© B. Clément.



Figure 35

Fabrication de briques de terre crue en Iran. © CRAterre/D. Gandreau.



Figure 36

Enduits sur la mosquée de Djenné au Mali. © CRAterre

ré-enduisage¹⁰ régulier, tous les deux à trois ans, est réalisé de manière collective et participative, en utilisant des terres enrichies d'adjuvants naturels, avec en particulier la balle de

10. Recouvrir une surface, comme un mur, avec un matériau (plâtre, argile, mortier) pour la protéger ou la décorer.

riz, mais aussi de la poudre de baobab pour les parties les plus exposées.

A plus petite échelle, sur l'île de Saï, au Soudan, ce sont les femmes qui assurent entièrement la maintenance des habitations, ré-enduisant murs et sols avec des mélanges traditionnels bien plus élaborés qu'il pourrait paraître au premier regard (Figures 37 et 38).

Ce qui frappe, c'est ces gobelets entourant la femme en train de refaire un sol en terre. Leur contenu est d'une richesse insoupçonnée : gomme arabique, pailles fermentées, bouse de vache, et bien d'autres ingrédients encore. Ces recettes, dont tous les secrets ne nous ont pas été dévoilés, contribuent sans doute à ce qu'on appelle le *génie du lieu*.

Une première étude a toutefois été entreprise visant à regrouper des informations récoltées çà et là dans la perspective d'élaborer un inventaire de ces recettes traditionnelles et de classifier les différents adjuvants naturels utilisés. Cela a de fait conduit à s'intéresser aux caractéristiques chimiques des biopolymères¹¹, et plus particulièrement à une question clé : comment les argiles interagissent-elles avec ces composés ?

Cette étude a fait l'objet d'une publication (figure 39), disponible en ligne.

11. Polymères (molécule formée de longues chaînes répétitives d'unités plus petites) issus de la biomasse et donc produits par des êtres vivants comme les végétaux, les algues, les animaux ou les moisissures.

Ce premier effort de synthèse a permis de distinguer quatre grandes familles de biopolymères (**Figure 40**) : les polysaccharides¹² (les plus répandus et les plus prometteurs), les lipides¹³, les protéines¹⁴, et une catégorie « autre », qui inclut notamment les tanins¹⁵, bien moins fréquents.

6 Perspectives

Cet ouvrage l'usage des biopolymères dans le domaine de la construction en terre ne se limite pas à une simple présentation de données. Il illustre aussi comment appliquer concrètement les résultats de cette recherche. Nous partageons ici une expérience vécue, celle de la conservation préventive des sites archéologiques en terre, nombreux et particulièrement fragiles. L'enjeu est crucial : stabiliser les effets du temps et enrayer le processus de dégradation qui s'accélère dès que les lieux sont abandonnés.

12. Sucres complexes formés de nombreuses unités de sucre simples, comme l'amidon ou la cellulose, utilisés par les plantes et les animaux pour stocker de l'énergie ou former des structures.

13. Substances grasses présentes dans les organismes vivants, utilisées pour stocker de l'énergie, protéger les organes et constituer les membranes des cellules.

14. Molécules constituées d'acides aminés, essentielles pour construire les tissus du corps, catalyser les réactions chimiques et assurer de nombreuses fonctions dans les organismes vivants.

15. Substances naturelles présentes dans certaines plantes, utilisées pour tanner le cuir ou comme protection contre les insectes et les microbes.



Figure 37

Femme devant un sol ré-enduit sur l'île de Saï au Soudan. © CRAterre/D. Gandreau.



Figure 38

Femme enduisant un sol sur l'île de Saï au Soudan. © CRAterre/D. Gandreau.

Pour relever ce défi, nous avons collaboré avec des collègues tadjiks en nous inspirant des savoir-faire locaux. L'architecture présente dans le village voisin de Pendjikent, presque entièrement construit en terre,

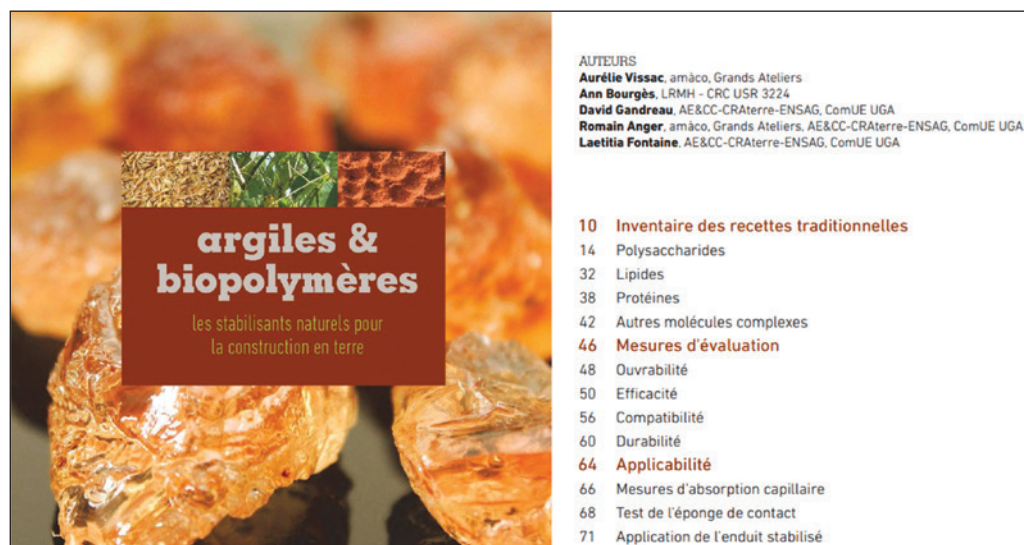


Figure 39

Ouvrage « Argiles et biopolymères ».

résiste remarquablement bien, notamment grâce à la qualité des enduits traditionnels. Ceux-ci intègrent des

mélanges de paille et de balle de riz, des matériaux largement disponibles localement, parfaitement maîtrisés par les artisans.

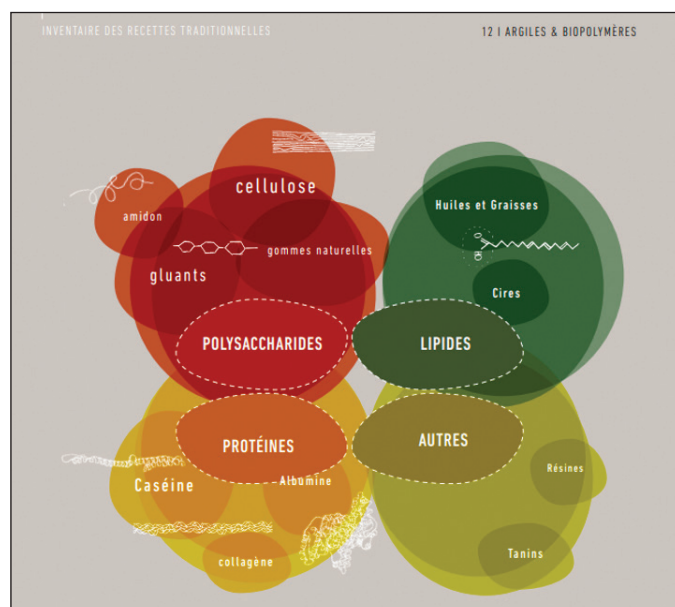


Figure 40

Les familles de polymères.

Nous avons sollicité ces artisans pour réaliser des enduits stabilisés à base de paille et de balle de riz. Des essais réalisés ont permis de mettre en évidence que l'apport de ces matériaux dans le mélange permet de réduire de moitié le taux d'absorption d'eau et d'humidité dans les murs, tout en préservant une bonne perméabilité – une protection totale contre l'eau étant impossible. Après ces quelques essais qui ont pu être réalisés sur le terrain, les résultats ont été rapides et concluants et il a donc été décidé de ré-utiliser ces recettes pour répondre aux problèmes d'érosion des vestiges archéologiques, sous forme d'enduits sacrificiels.

Aujourd'hui, ces enduits protègent donc de façon quasi

Tests d'enduits en terre stabilisés pour le site archéologique de Sarazm au Tadjikistan



Quelques éléments de contexte

Le site proto-urbain de Sarazm se situe au Tadjikistan, à l'ouest de la ville de Pendjikent, proche de la frontière avec l'Ouzbékistan et de la ville de Samarkand. Découvert en 1976, il s'étend sur une surface connue de 50 ha dans la vallée du Zeravchan, à 910 mètres d'altitude. Les seize secteurs fouillés, dont cinq sont aujourd'hui protégés par des couvertures métalliques ont révélé des installations appartenant à la civilisation proto-urbaine eurasiennne qui s'est développée aux périodes du chalcolithique et du bronze moyen (IV-III mill. BC). Les vestiges d'architectures comprennent des logements, des ateliers, des espaces de stockage et des édifices monumentaux. À l'exception de quelques soubassements en galets, ils sont entièrement construits en terre, selon deux techniques principales : la brique de terre et une forme de bauge, localement appelée pakhsa. Ces techniques persistent dans l'architecture traditionnelle de la région de Pendjikent même si plus de 90 % du territoire est montagneux.



Vestiges d'architectures en terre à Sarazm, secteur 11

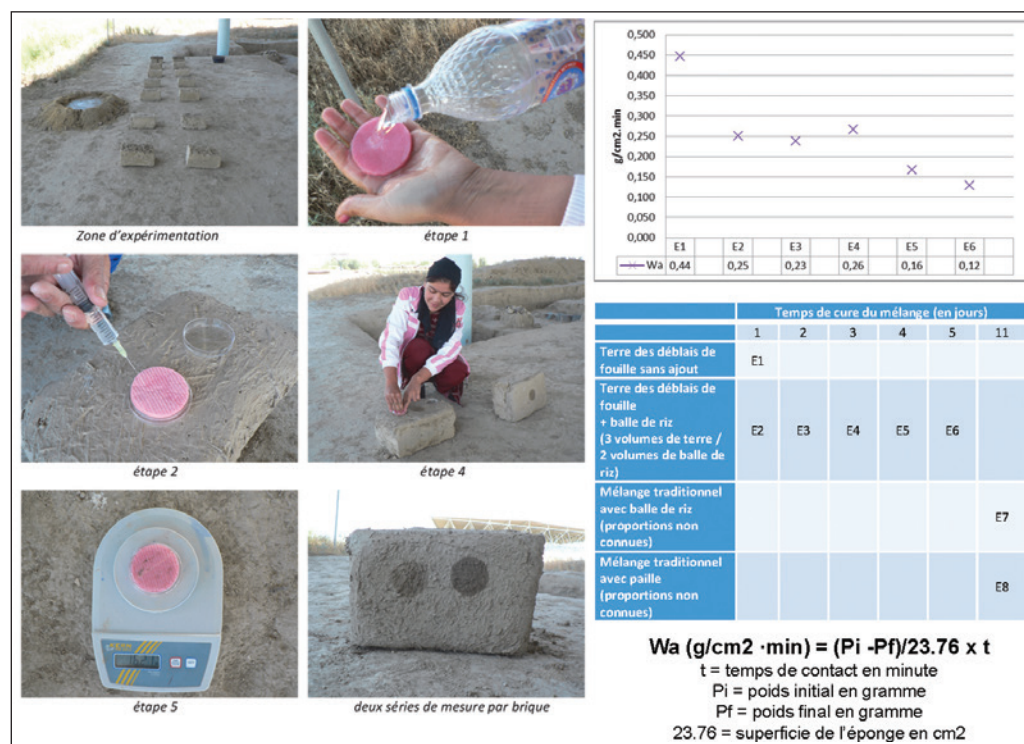
Figure 41

Présentation du site archéologique de Sarazm au Tadjikistan proche du village de Pendjikent.



Figure 42

Enduit du village de Pendjikent
et gros plan sur la balle de riz.
© CRAterre/D. Gandreau.



Figures 43, 44, 45

Exercices de terrain pour site archéologique de Sarazm au Tadjikistan. © CRAterre/D. Gandreau.

systématique les murs mis au jour lors des fouilles, stabilisant les ruines en attendant leur potentielle valorisation. Cette méthode, qui s'appuie sur des stabilisants naturels, se diffuse rapidement dans le

domaine de la conservation du patrimoine.

Au-delà d'apporter des réponses à la préservation de tels sites du patrimoine archéologique, nous sommes convaincus – notamment au

sein de CRAterre et de la chaire UNESCO – que ces matériaux offrent un potentiel immense pour les éléments de second œuvre dans l'habitat : enduits de finition, décors, ou encore claustras acoustiques.

Nombre de ces applications en second œuvre pourraient rapidement bénéficier des avancées issues des recherches menées, notamment dans le cadre du projet Tercel, réalisé au sein de la formation de niveau Master Design de l'ENSAG-UGA (**Figure 47**), sous la direction d'Arnaud Misse et de Milena Stéfanova.

Ce projet explore l'utilisation de terres de lavage, résidus issus du lavage des granulats (graviers, sables) pour l'industrie cimentière, qui génèrent d'énormes quantités de déchets. Pour nous, ces argiles représentent une ressource précieuse. Comment les valoriser ? En les combinant avec d'autres rebuts industriels, comme ceux de l'industrie papetière. Les premiers résultats sont extrêmement prometteurs et pourraient ouvrir des perspectives pour l'habitat contemporain, tout en recyclant ce que l'on considère aujourd'hui comme des déchets de production. Reste à le démontrer de manière plus approfondie avec de premières applications d'ampleur dans des projets réels.

Pour aller plus loin que le simple renouveau du pisé – qui, lui, ne recourt pas à des stabilisants naturels –, il est probable que ce type de



Figure 46

Exemples d'utilisation d'enduits en tant que matériaux de second œuvre.
© CRAterre/D. Gandreau.



Figure 47

Une des propositions résultat du projet TerCel mené dans le cadre du Master Design de l'ENSAG-UGA © CRAterre/D. Gandreau.

recherches nous permette de développer des matériaux plus sains et durables pour la construction de demain.

Conclusion

Quelle que soit la période ou l'angle privilégié – architecture, ingénierie, durabilité, esthétique, histoire, etc. –, la recherche sur les matériaux de construction à base de ressources bio et géo-sourcées se révèle riche et surprenante. Cette diversité exceptionnelle en fait un domaine captivant, offrant un terrain d'études original pour les ingénieurs et les scientifiques, restant encore largement à explorer.

Cela nous invite à découvrir une autre dimension, plus profonde : à côté de la fierté d'innover, il faut aussi célébrer la modestie. Reconnaître que nos ancêtres, eux aussi, observaient, inventaient et faisaient évoluer leurs pratiques. Qui aurait imaginé, il y a encore peu, que l'habitat en terre deviendrait une source d'inspiration pour les générations présentes et futures ? Masi que de potentiel pour des solutions innovantes que, nous l'espérons, déclenchera notre présentation et cette retranscription qui en a été faite.

Notre ambition, à travers ces pages, est de transmettre au lecteur cette double satisfaction : celle de l'invention, et celle de la cohérence avec l'héritage des civilisations. C'est là, à nos yeux, l'apport fondamental de ce travail – une vision du progrès dans ce qu'il a de plus essentiel mais surtout qui réponde véritablement aux grands enjeux globaux actuels de développement durable et d'amélioration des conditions de vies des populations de notre planète, en respect de leur diversité culturelle.

Gageons que ce message, porté par tous ceux qui partagent cette conviction, saura susciter des vocations dont il est fortement probable qu'elles pourront largement s'épanouir et rayonner.