

Lavie Arsène Mango-Itulamya

mangoarsene@gmail.com

In Mango-Itulamya, L. A. (2019). Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. Thèse de Doctorat. Université de Liège, Liège.
<http://hdl.handle.net/2268/234994>

I.2 La construction en terre crue

I.2.1 Historique

La « terre » est utilisée comme matériau de construction depuis onze millénaires sur tous les continents (Anger et al. 2011). Ce terme désigne un matériau sédimentaire naturel présent dans les sols et les sédiments qui résulte de l'altération physique (fragmentation sans modification de la nature des minéraux), chimique et biologique d'une roche mère sous l'action du climat, de l'érosion ou des organismes vivants (Pesson, 1971 ; Soltner, 1992). Il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'Humanité. D'après l'UNESCO, 20% du nombre de site enregistrés comme patrimoine mondial sont entièrement ou partiellement construits en terre (Anger et al. 2011). Ceci témoigne du riche patrimoine architectural en terre crue.

Au cours des temps, la terre est apparue comme le matériau de construction privilégié par l'Homme. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau que l'on a sous les pieds (Anger et al. 2011). La ville syrienne de Tell Feres de plus de 7000 ans ainsi que la Citadelle d'Ulug Dépé de plus de 5000 au Turkménistan sont quelques exemples (Fig. 1). À l'Antiquité et au Moyen-Age, plusieurs constructions en terre ont été réalisées telles que la cité antique de Volubilis au Maroc, ou le grand Kyz Kala à Merv au Turkménistan (Moriset, 2018, Fig. 1).



Fig. 1. Exemples anciens de constructions en terre. De gauche à droite : fondation d'une maison dans la ville de Tell Feres en Syrie, citadelle d'Ulug Dépé au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala au Turkménistan (Moriset, 2018).

Plusieurs constructions modernes en terre réparties aux quatre coins de la planète montrent la persistance de l'intérêt pour la construction en terre (Fig. 2). Dans des régions rurales d'Amérique Latine, d'Asie ou d'Afrique, la terre a été et est toujours utilisée comme un matériau de construction privilégié. Par contre, en Europe, comme dans d'autres pays industrialisés, la terre crue a perdu de plus en plus d'importance avec l'industrialisation au XIXe siècle. Il s'en est suivi une perte des savoir-faire (Casel, 2000). Suite à la crise énergétique des années 1980, la terre crue a peu à peu regagné l'intérêt des architectes. Mais la terre crue doit encore retrouver sa place dans la gamme des matériaux de construction existants.

Dans les pays en voie de développement, la terre crue est souvent considérée comme symbole de pauvreté. La construction en terre est remplacée par des constructions en béton, tôle et parpaing, considérées comme modernes et durables (CRAterre et al., 1979 ; Anger et Fontaine, 2009 ; Anger et al., 2011).

Dans le bâtiment, la terre peut être utilisée comme isolant associé à la paille ou pour la rénovation, réparateur des bâtiments construits en terre, couche de finition intérieure, mur porteur, enduit intérieur (Ecoconso, 2017).



Fig. 2. Exemples récents de constructions en terre. De gauche à droite : le Fort d'Al Jahili, Al Ain à Abou Dhabi aux Emirats arabes unis créé en 1891 et restauré en 2008 ; le marché de Koudougou au Burkina-Faso construite en blocs de terre comprimée au début des années 2000 ; une école en pisé à Koné en Nouvelle Calédonie construite en 2017 ; quartier de 65 logements construit en 1985 principalement en blocs de terre comprimée et pisé à L'Isle-d'Abeau en France (TerraLyon, 2016).

1.2.2 Avantages de la terre crue

Face aux préoccupations environnementales actuelles, la terre crue revient à l'honneur grâce à ses nombreux avantages. La terre crue peut être utilisée en construction neuve, en rénovation et pour la réhabilitation tant de manière traditionnelle que contemporaine. La terre crue présente des nombreuses qualités et constitue un matériau d'avenir (AsTerre, 2016).

- La terre est issue d'une ressource locale ; ce qui réduit les problèmes liés au transport. Elle nécessite peu d'énergie d'extraction, de transformation et de production. Son utilisation « crue » ne contribue pas à la déforestation comme c'est le cas dans certaines régions du monde où l'on utilise le bois pour la terre cuite (Agarwal, 1981 ; Houben et Guillaud, 1989, Mango-Itulamya, 2015).
- Sa transformation est peu coûteuse et fait souvent appel à une main d'œuvre locale. La fabrication se prête à l'auto-construction. La terre ne nécessite que des outils simples et largement accessibles pour son extraction, sa transformation et sa mise en œuvre (La maison écologique, 2004 ; Pignal, 2005).
- La terre joue un rôle d'amortissement acoustique et régule la température et l'humidité ambiante. La terre crue purifie l'air ambiant en filtrant certains polluants et en absorbant les odeurs (Fontaine et Anger, 2009 ; Ecologik, 2010).

Malgré ces nombreux avantages, la terre crue présente quelques inconvénients. D'une part, dans les régions à climat tempéré comme en Belgique, la pluie et le gel diminuent ses propriétés mécaniques et limitent sa durabilité. D'autre part, dans les régions à climat équatorial comme en R.D.Congo, les variations importantes d'humidité rendent les matériaux en terre crue instables. Ils s'érodent à chaque saison. Sans liant stabilisateur, le matériau dégage de la poussière. La terre se dégrade au contact de l'eau et de l'humidité, ce qui rend son emploi délicat (Agarwal, 1981 ; Kurf et al., 1998 ; AsTerre, 2016).

Dans plusieurs régions, les habitants ont développé des traditions architecturales basées sur plusieurs styles et systèmes de constructions en terre (Fig. 3) pour protéger le mur de l'érosion (Bolle, 2017).

La pyramide est une construction en damier qui alterne des blocs de terre plus sableux et des blocs plus argileux. Les blocs sableux permettent un écoulement plus rapide de l'eau, les blocs argileux donnent la stabilité à la structure (Daneels et Guerrero, 2011). Une évolution de ce système consiste à insérer dans le mur en terre des bandes horizontales d'un matériau plus

résistant à l'érosion (terre cuite, mélange terre chaux ou terre ciment). Ces bandes ralentissent la vitesse d'écoulement de l'eau. Cette technique est surtout utilisée dans les constructions en pisé (Baur, 2012). Le revêtement à base d'enduit d'origine végétale ou animale est une tradition millénaire pour lutter contre l'érosion des structures en terre (Daneels, 2008). La technique la plus employée pour préserver un mur de terre de l'érosion liée à l'eau consiste à protéger sa base et son sommet. Comme le dit un dicton, un mur en terre nécessite « un bon chapeau et de bonnes bottes » (Heitz, 2014). Cela consiste à protéger le mur d'un toit débordant qui évite au mur d'être trempé par la pluie, et d'un soubassement en pierre, brique cuite, béton de ciment, qui empêche toute remontée capillaire.



Fig. 3. Illustration de quelques moyens de lutte contre la détérioration d'une construction en terre crue. De gauche à droite : vestige de la pyramide en terre crue de La Joya au Mexique (1^{er} siècle) ; vestige d'un mur enduit à Dja'de el Mughaba en Syrie (9^{ème} siècle av. J.-C) ; maison en pisé avec un toit débordant et un soubassement en béton de ciment construite en 2018 à Villefontaine en France (Daneels, 2008 ; Moriset, 2018).

En outre, plusieurs obstacles ralentissent l'usage de la terre crue à grande échelle. Dans les pays industrialisés, le manque des professionnels formés aux techniques de construction en terre crue, le manque de normes constructives en terre crue, le manque de diffusion auprès du grand public, du soutien institutionnel et des collaborations interprofessionnelles sont les principaux freins (TerraLyon, 2016). La nécessité de main d'œuvre importante pour sa mise en œuvre constitue également un important frein d'ordre économique. Ce frein est peu ou pas présent dans les pays en développement : la construction en terre représente une alternative de construction intéressante (Adam et Agib, 2001). Cependant la terre est parfois considérée comme un matériel de mauvaise qualité et de ce fait rejetée par les populations locales (Njoya et al., 2015 ; Bogaert et Halleux, 2015).

I.2.3 Techniques de construction en terre crue

Il existe différentes techniques de construction en terre crue selon les contextes géographiques, les modes de vie, les coutumes locales, le climat ainsi que les matériaux disponibles. Houben et Guillaud (1989) ont répertorié 12 techniques principales de construction en terre crue (Fig. 4 et Tableau 1). Les cinq techniques de construction les plus répandues dans le monde sont présentées ci-dessous, à savoir le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et le bloc de terre comprimée (BTC, Anger et Fontaine, 2009 – Tableau 2).

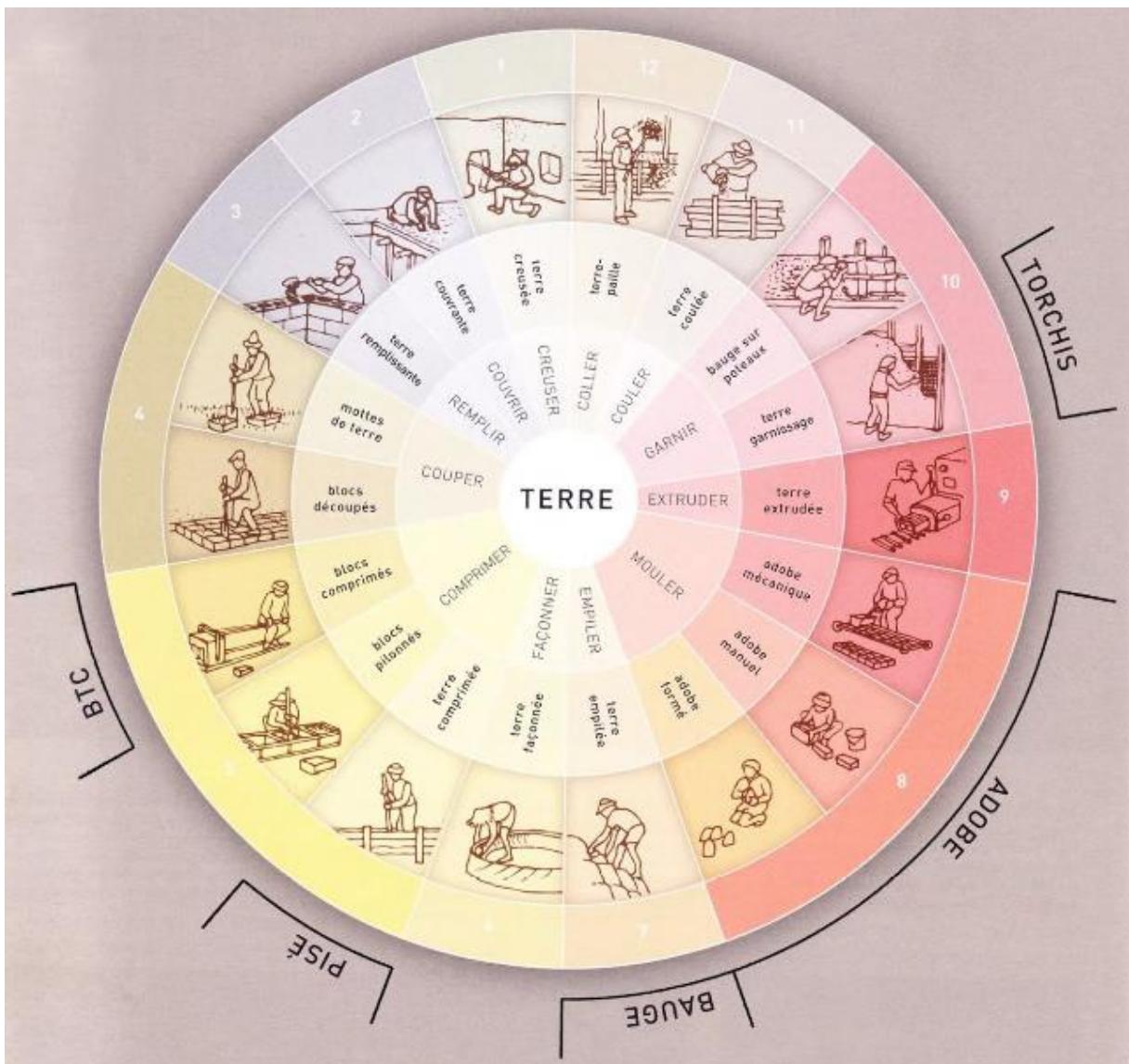


Fig. 4. Techniques de construction en terre (Anger & Fontaine, 2009).

Techniques	Description
Terre creusée	Habitat creusé dans l'épaisseur du sol
Terre recouvrante	Terre qui recouvre une structure construite avec un autre matériau
Terre remplissante	Terre qui remplit une enveloppe faite de matériaux creux
Terre découpée	Blocs de terre directement découpés dans le sol
Terre comprimée	Terre comprimée dans des moules ou des coffrages
Terre façonnée	Terre façonnée à l'état plastique à la main
Terre empilée	Boules de terre empilées en murs épais
Terre moulée	Terre moulée dans des moules de formes diverses
Terre extrudée	Terre extrudée à l'aide d'une machine
Terre coulée	Terre coulée dans un coffrage ou un moule
Terre-paille	Matériau léger constitué d'une barbotine argileuse liée aux fibres
Terre garnissante	Terre mélangée aux fibres qui garnit en couches minces un support

Tableau 1. Différentes techniques de construction en terre (Houben et Guillaud, 1989).

Techniques courantes	Pisé	Bauge	Torchis	Adobe ou brique crue	Terre Comprimée
Description	Le pisé est un procédé de construction qui consiste à compacter de la terre disposée dans un coffrage en couches successives peu épaisses à l'aide d'un pilon (Houben et Guillaud, 1989).	La construction en bauge consiste à façonner des murs massifs et épais à l'aide d'une terre mise en œuvre à l'état plastique, généralement sans l'aide de coffrage (Houben et Guillaud, 1989).	Le torchis est une technique de remplissage d'ossature avec un mélange de terre fibrée (CRAterre et al., 1979).	Les adobes sont des briques de terre crue moulées sans compactage et séchées au soleil. Leur taille et leur forme varient selon les moules utilisés (Houben et Guillaud, 1989).	Le Bloc de Terre Comprimée (BTC) est une évolution de l'adobe. La terre, généralement stabilisée, est compactée à l'aide de presse manuelle ou mécanique (Houben et Guillaud, 1989).
Terre à utiliser	La terre à pisé est un mélange hétérogène de particules de terre de grosses variables allant de cailloux (< 6 cm) aux argiles (< 2µm) (Houben et Guillaud, 1989 ; Anger et Fontaine, 2009).	La terre à bauge est généralement très argileuse, avec du sable, des graviers, ainsi que des fibres végétales (Houben et Guillaud, 1989).	La terre limono-argileuse est une des meilleures terres pour la construction en torchis. Cependant, différentes recettes existent pour fabriquer le torchis (Babylas et al. 2012).	Les terres constituées de sable, de limon et d'argile seraient les plus aptes à la fabrication de l'adobe (CRAterre et al., 1979).	La brique de terre comprimée est produite à partir de la même terre que le pisé, mais débarrassée par tamisage de grains > 2 cm (Houben et Guillaud, 1989).

Tableau 2. Principales techniques de construction en terre crue.

I.3 Le matériau terre

I.3.1 Généralités

On parlera ici de « terre » pour désigner un matériau sédimentaire naturel utilisé pour la construction. Ce matériau résulte de l'altération d'une roche mère. La terre peut être résiduelle (i.e., sol) ou avoir été transportée par l'eau ou le vent (i.e., dépôt sédimentaire). Ce matériau sédimentaire est principalement constitué d'une fraction solide inorganique constituée de particules de taille variable (i.e., gravier > 2mm, sable > 63 µm, limon ou silt 63-2 µm, argile < 2 µm (Tucker et Hardy, 1988) et de constituants organiques (matière organique fraîche et/ou transformée). Outre la fraction solide, la terre contient également une phase aqueuse et gazeuse

présente dans les pores du matériel (Soltner, 1992). Dans les sols, seuls les niveaux situés sous les couches riches en matière organique (horizons O et A, Delecour, 1981) peuvent être utilisés comme matériau de construction (Guérin, 1985 ; Fig. 9).

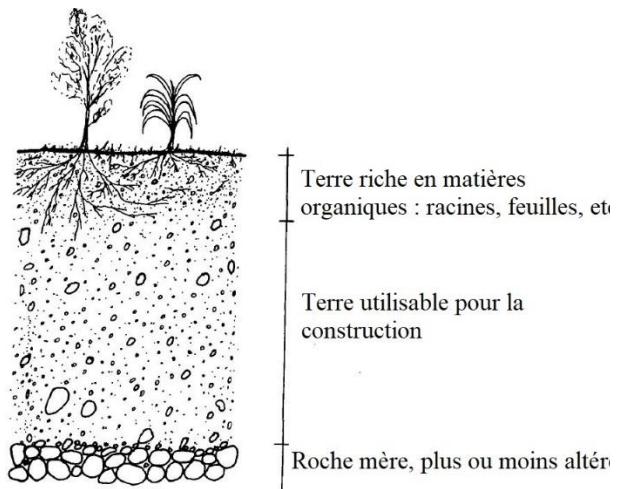


Fig. 9. Coupe dans la couche de terre (Guérin, 1985, modifié).

L'importance relative des éléments constitutifs influence les propriétés physiques (plasticité, pouvoir absorbant) et conditionne les applications techniques de chaque type de terre (Rigassi, 1995).

Les graviers ($2 \text{ mm} \leq D < 64 \text{ mm}$) et **les sables** ($0,063 \text{ mm} \leq D < 2 \text{ mm}$) constituent les éléments grossiers de la terre à bâtir. Ils constituent le squelette et augmentent la perméabilité à l'eau de la terre. En outre, la fraction sableuse limite le gonflement et le retrait de la terre (Houben et Guillaud, 1989).

Les limons ont une granulométrie comprise entre 0,063 et 0,002 mm. Ils possèdent une grande friction interne, une faible cohésion en présence d'eau et une grande perméabilité (Rigassi, 1995).

Les argiles sont définies soit par leur granulométrie (i.e., particules de taille inférieure à 2 micromètres), soit par leur minéralogie (i.e., famille des phyllosilicates, Weaver, 1989). Les minéraux argileux sont des silicates ayant une structure cristalline en couches (i.e., *phyllo* signifie *feuille* en grec). Cependant tous les phyllosilicates ne sont pas des argiles (Moore et Reynolds, 1989). Un grain d'argile est donc un ensemble de feuillets, plus ou moins épais, avec des liaisons plus ou moins fortes entre feuillets. Le feuillett est un édifice de moins d'un nanomètre d'épaisseur, composé de trois ou quatre plans d'anions tels que l'oxygène O^{2-} ou l'hydroxyle OH^- entre lesquels s'insèrent de petits cations principalement de silicium, d'aluminium et de magnésium. La charge nette du feuillett dépend des proportions d'anions et de cations. L'empilement de feuillets correspond à une couche et l'ensemble de couches constitue le cristal. Les feuillets sont formés par une combinaison de plans constitués par les atomes agencés en tétraèdre SiO_4^- . Dans les phyllosilicates, six tétraèdres s'agencent en se partageant les oxygènes pour former des feuillets (Fig. 10 - Brindley et Brown, 1980 ; Moore et Reynolds, 1989 ; Bouchet et al, 2000 ; Anger, 2011)

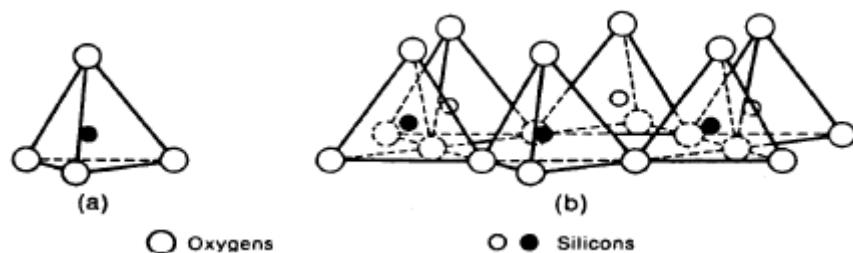


Fig. 10. Éléments structuraux : les tétraèdres. a. Tétraèdre de silice b. tétraèdres de silice arrangés dans un réseau hexagonal (in Eslinger et Peaver, 1988).

Les tétraèdres (T) s'agencent à des feuillets octaédriques (O) pour former des couches. Le feuillet octaédrique comprend un cation central (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+}) et 6 OH^- (Fig. 11). Les couches peuvent être neutres ou chargées négativement. Ces charges négatives sont compensées par des cations qui se logent dans l'espace entre les couches (espace interfoliaire). La charge de la couche dépend des substitutions de cations dans les feuillets T ou O (Moore et Reynolds, 1989 ; Bouchet et al., 2000 ; Anger, 2011).

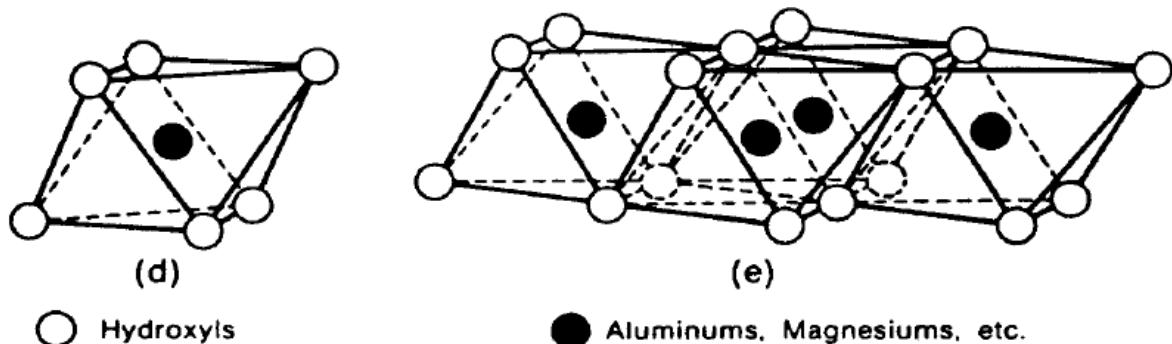


Fig. 11. Éléments structuraux : les octaédres. d. Unités octaédrique. e. Unités octaédriques réunies dans une structure de feuille octaédrique (in Eslinger et Peaver, 1988).

Kaolinites, smectites, illites et chlorites constituent l'essentiel des argiles que l'on trouve dans les terres. Ce sont elles qui assurent à la terre sa cohésion. Les **kaolinites** sont des argiles combinant un feuillet T et un feuillet O (minéraux 1/1). L'équilibre des anions et des cations est strictement respecté et le feuillet est donc électriquement neutre. Les **smectites** se composent de 2 couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Elles ont un feuillet qui porte une charge nette négative, compensée par des cations supplémentaires situés à la surface des feuillets et entourés de molécules d'eau. Les **illites** ont une structure 2/1 comme les smectites mais celle-ci diffère par un déficit de charges positives élevé compensé par la présence de cations K⁺ dans l'interfoliaire. Les **chlorites** ont une structure de base formée de deux feuillets alternés (minéral 2/1/1). Le premier est négatif, le second positif compense la charge négative du premier, ce qui conduit à un assemblage neutre (Moore et Reynolds, 1989 ; Bouchet et al, 2000). La nature et les caractéristiques des argiles sont liées à leur mode de formation (Moore et Reynolds, 1989).

I.3.2 Propriétés des terres

Toutes les terres ne sont pas adaptées à la technique de construction en BTC. Les normes d'utilisation des terres dans la construction en BTC se basent principalement sur leur granulométrie et leur plasticité (Tableau, 6). Ces caractéristiques influencent le comportement des BTC produits (Khalfaoui et Hajjaji, 2009).

Pays	Documents de référence	Critères de sélection de la terre
USA	NMAC 14.7.4 (2000)	Peu de recommandations : les unités constructives doivent être testées
France	XP P 13-901 (2001)	Granularité, plasticité et nature de la terre
Nouvelle Zélande	NZS 4297 (1998)	Les unités constructives doivent être testées
Pérou	NTE E 080 (2000)	Granularité
Afrique	ARSO (1996)	Granularité, plasticité et nature de la terre
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	Granularité, sels, teneur en matière organique et cohésion
Allemagne	Lehmbau Regeln (1999)	Force de liaison, plasticité et granularité.
Australie	HB 195 (2002)	Granularité
Espagne	MOPT (1992)	Granularité

Tableau 6. Critères de sélection des terres pour la construction en BTC selon différentes normes (Jiménez et Guerrero, 2007).

Une synthèse de l'état de connaissance des principales propriétés de la terre crue utilisée en construction pour les BTC, selon différentes normes est représentée au Tableau 7.

Propriétés	Unités	Terre comprimée
Teneur en argile	%	5 à 30
Indice de plasticité IP	%	5 à 30
Teneur en eau initiale W_{in}	%	5 à 15
Masse volumique sèche ρ	kg/m^3	1600 à 2200
Teneur en eau ambiante w	%	0 à 5
Retrait de séchage	%	1 à 3
Coefficient résistance à la vapeur μ		5 à 20
Module de Young E	GPa	1,0 à 6,0
Résistance compression R_c	MPa	0,4 à 3,0
Résistance traction R_t	MPa	0,1 à 0,5
Capacité thermique massique c	J/kg.K	600 à 1000
Capacité thermique volumique C	$\text{kJ}/\text{m}^3.\text{K}$	960 à 2200
Conductivité thermique λ	$\text{W}/\text{m.K}$	0,5 à 1,7

Tableau 7. Synthèse des principales propriétés de la terre comprimée (Moevus et al., 2012).

La **granulométrie** et la plasticité (limites d'Atterberg) constituent les paramètres principaux pour déterminer la convenance d'une terre (Jiménez et Guerrero, 2007). La granulométrie influence l'aptitude au façonnage et au séchage de la terre. Des terres qui n'ont pas la granulométrie requise pour des matériaux en BTC peuvent cependant donner des bons résultats en ajoutant des stabilisants adéquats (Moevus et al. 2012). Il existe plusieurs outils de mesure de la granulométrie : tamisage, sédimentométrie, imagerie, diffraction laser, microscopie. En l'absence de ces outils, des mesures peuvent être réalisées directement sur terrain.

- Les tests de la vue et du toucher de la terre (sèche ou humide) permettent d'identifier les graviers, les sables grossiers et les sables fins ($> 100 \mu\text{m}$).
- Le test de lavage de main consiste à se frotter les mains avec une terre liquide, puis à les rincer doucement avec l'eau. Si le lavage des mains est difficile, cela confirme qu'il s'agit d'une terre argileuse.
- Le test de la bouteille mesure les proportions des grains. On remplit une bouteille transparente de 1/4 de terre et 3/4 d'eau, on l'agit puis on la laisse décanter jusqu'à ce que l'eau soit claire. On note les proportions des différents constituants après sédimentation : le gravier et le sable se retrouvent au fond, le silt et l'argile au sommet (Houben et Guillaud, 1989).

La **plasticité** est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans rupture (Peltier et Rumpler, 1959). La terre a un comportement élasto-plastique. Elle présente une déformation élastique réversible et une déformation plastique irréversible. La plasticité d'une terre dépend de la teneur en argiles et de leur nature (et donc de leur capacité d'adsorption d'eau). Les limites d'Atterberg, i.e. limites de liquidité W_L et de plasticité W_P , sont les indicateurs de plasticité couramment employés (Moevus et al. 2012). Le test du cigare permet de mesurer la plasticité de la terre sur terrain. Il consiste à fabriquer un cigare de 3 cm d'épaisseur et le pousser doucement dans le vide. Si le cigare ne se brise pas au-delà de 20 cm, il s'agit d'une terre argileuse et plastique (CRAterre et al., 1979).

La **teneur en eau initiale** est un paramètre essentiel. En effet, l'eau renforce la cohésion naturelle de la terre en intensifiant l'interaction entre les particules d'argiles. Sans eau, il serait impossible de construire un mur en terre (Fontaine et Anger, 2009).

La **teneur en matière organique** est généralement considérée comme néfaste dans les constructions en terre crue car sa décomposition augmente la porosité et diminue leur résistance (CRAterre et al., 1979). Il est déconseillé d'utiliser une terre contenant plus de 2% de matière

organique. Certains stabilisants tels que la chaux peuvent réduire l'influence néfaste de la matière organique (CRAterre et al., 1979). Une identification de la présence de la matière organique peut être faite sur terrain en humidifiant la terre. Si la terre humide sent l'humus, il s'agit d'une terre riche en matières organiques (Houben et Guillaud, 1989).

L'analyse chimique donne les principaux groupes d'atomes exprimés en pourcentage massique d'oxydes présents dans l'échantillon. Ces éléments justifient plusieurs propriétés des argiles dont la couleur, le degré d'interaction avec des liants, etc. Aucune recommandation sur la teneur en pourcentage d'oxydes pour une terre crue n'a été trouvée dans la littérature.

Les minéraux argileux donnent au sol sa cohésion et l'essentiel de sa résistance mécanique en agissant comme liant entre les éléments plus grossiers qui constituent le squelette. L'argile garde sa cohésion lorsque la teneur d'eau est inférieure à la limite de liquidité. Pour des teneurs d'eau élevées, les argiles perdent toute cohésion et acquièrent une consistance liquide (CRAterre et al., 1979). La nature des argiles dans l'échantillon de terre va influencer les propriétés de gonflement, de fissuration de la terre crue ainsi que la quantité d'eau nécessaire à ajouter (Tardy, 1993 ; Andrade et al., 2011). Le Tableau 8 illustre les principaux **constituants minéraux** de la terre et leurs propriétés physiques. Aucune recommandation sur la nature des minéraux argileux pour une terre propice à la fabrication des BTC n'a été trouvée dans la littérature.

Désignation	Principaux composants	Propriétés physiques
Sable siliceux	Quartz	Sans cohésion, abrasif
Mica	Muscovite	Sans cohésion
Carbonates	Calcite, dolomite	Susceptible d'influencer le pH
Sulfates	Gypse	Susceptible d'attaquer certains ciments
Argiles	Kaolinite	Pas de gonflement, plasticité faible Peu de cohésion
	Illites et micas partiellement dégradés	Gonflement Plasticité moyenne
	Smectites	Très gonflante, Très plastique
	Chlorite, vermiculite	Gonflement limité
Matière organique	Débris végétaux, racine	Dégénération rapide

Tableau 8. Principaux constituants inorganiques (minéraux) ou organique des sols et leurs propriétés physiques (CRAterre et al., 1979).

Le **réseau poreux** détermine les phénomènes d'adsorption-désorption d'eau et de transport de vapeur d'eau. La quantité d'eau dans la terre correspond à une valeur de succion qui détermine les forces capillaires au sein de la microstructure. La présence d'eau influence les propriétés mécaniques et thermiques de la terre (Moevas et al. 2012).

La **consistance** de la terre à la mise en œuvre dépend de la teneur en eau. Lorsqu'elle augmente, on atteint la limite plastique. La pâte devient de plus en plus malléable jusqu'à la limite liquide. Au-delà, la pâte ne peut plus être modelée (Andrade, 2011). Dans le cas des BTC, la teneur en eau optimale de la terre peut être obtenue par essai Proctor et correspond à la densité maximale pour une énergie de compaction donnée (Proctor, 1933).

Les propriétés hygrométriques, mécaniques et thermiques de la terre dépendent de la porosité totale, la distribution et la taille des pores, la teneur en argiles, la surface spécifique des argiles

et leur capacité d'échange cationique, l'empilement granulaire (Heathcote, 2002 ; Moevus et al. 2012).

La terre est un matériau qui permet de réguler l'hygrométrie dans une pièce. Si l'air ambiant est humide la terre va se charger en humidité. Par contre si l'air ambiant est sec, la terre va s'assécher. Cela participe au confort intérieur de la pièce (Jquin 2009 ; Allinson et Hall, 2010). L'hygrométrie d'une terre dépend de plusieurs propriétés :

- de l'humidité relative et de la température ;
- de la taille, de la forme et du nombre de pores ;
- de l'affinité des argiles avec l'eau;
- du chemin hydrique parcouru (mouillage/démouillage, Moevus et al. 2012).

Dans les conditions d'une humidité relative inférieure à 70 %, la teneur en eau de murs en terre est généralement comprise entre 0,5 et 5%. Elle peut être supérieure en présence d'argiles gonflantes et de granulats contenant des micropores et micro-rugosités (Moevus et al. 2012). Il existe plusieurs **mesures hygrométriques** :

1. La capacité d'absorption de la vapeur d'eau définit la quantité de vapeur que peut stocker un mur en terre dans des conditions de température et d'humidité données. Elle peut être établie par les isothermes de sorption ou les courbes de rétention d'eau (Jquin, 2009).
2. La perméabilité à la vapeur d'eau d'une terre renseigne sur sa capacité d'échange hygrométrique entre l'intérieur et l'extérieur d'une construction. Plus elle est élevée, plus les échanges entre l'air extérieur et l'air intérieur se font facilement, et plus l'équilibre hygrométrique est atteint rapidement (Moevus et al. 2012).
3. La diffusivité hydrique capillaire permet de décrire l'aptitude d'une terre à absorber l'eau par capillarité. Lorsqu'un échantillon de terre est mis en contact avec de l'eau, celle-ci va pénétrer le matériau par remontée capillaire dans les pores fins, sous l'action de la succion. La diffusivité hydrique capillaire s'exprime en m^2/s (Allinson et Hall, 2010).

Le **retrait** de la terre crue dépend de sa composition et de son squelette granulaire. Celui-ci peut être modifié par stabilisation granulaire, i.e. ajout de sable graviers ou de paille. Le retrait dépend également de la proportion d'argiles et de leur nature, de la porosité totale et de la quantité d'eau à la mise en œuvre. Le retrait d'une terre à partir de son état à la mise en œuvre peut varier entre 0,05 et 20% (Moevus et al. 2012).

La principale **propriété mécanique** de la terre est la résistance à la compression. La résistance à la compression uniaxiale de la terre influence le dimensionnement des ouvrages. Plus elle est élevée, plus l'épaisseur des murs pourra être faible pour une hauteur de bâtiment donnée. Les paramètres qui améliorent la résistance à la compression sont entre autres une densité élevée et une teneur en eau faible (Andrade et al., 2011).

Les **propriétés thermiques** intrinsèques du matériau terre sont la capacité thermique, la conductivité, la diffusivité et l'effusivité.

- La conductivité thermique définit la capacité d'un matériau à transmettre ou à retenir la chaleur. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant. La conductivité thermique de la terre dépend essentiellement de sa masse volumique et de sa porosité. Utilisée seule, la terre n'est pas un isolant, elle le devient par l'ajout de fibres (Speyer, 1994).
- La capacité thermique ou chaleur spécifique indique la quantité de chaleur à fournir à 1 m^3 de matériau pour éléver sa température de 1°K (Brown, 2001).
- La diffusivité thermique exprime la profondeur à laquelle la chaleur a un effet après une période de temps donnée. Elle exprime la capacité du matériau à transmettre une variation de température.

La température à l'intérieur s'élève d'autant plus rapidement que la conductivité de la paroi est élevée et que sa capacité thermique est faible (Jannot et Degiovanni, 2018).

- L'effusivité thermique représente la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie avec son environnement. Un matériau absorbe d'autant plus de puissance que sa conductivité est élevée, et que sa chaleur volumique est élevée (Speyer, 1994).

La **durabilité** d'un matériau est sa résistance à la détérioration au fil du temps. Elle dépend des propriétés du matériau et des agressions extérieures (e.g., impact des gouttes de pluie, cycles de mouillage/séchage, cycle de gel/dégel, retraits et expansions). Il existe 3 types d'essais pour évaluer la durabilité des matériaux en terre crue dans le temps :

- les essais indirects consistent à réaliser des tests qui ont peu ou pas de rapport avec les mécanismes de dégradations réels, mais où la propriété mesurée a un indicateur fiable de durabilité ;
- Les essais accélérés consistent à appliquer des phénomènes réels avec une intensité plus forte durant un laps de temps réduit ;
- les essais de simulation consistent à soumettre les échantillons à une sollicitation similaire à celle qu'ils peuvent subir en conditions réelles (Heathcote, 2002).

Plusieurs paramètres influencent la durabilité d'un BTC :

- La masse volumique de la terre (Patty, 1936).
- La composition de la terre. Heathcote (2002) montre que la durabilité augmente avec la teneur en argiles. Crowley (1997) montre que les sables argileux et les argiles ont une meilleure durabilité que les silts argileux.
- La nature du stabilisant utilisé (Heathcote, 2002).
- Le degré de compactage qui augmente la durabilité de façon exponentielle (Crowley, 1997).
- Les précipitations, le cycle gel-dégel et le cycle mouillage-séchage (Moevus, 2012).
- L'âge des échantillons en terre car l'érosion du BTC est généralement plus rapide au début de sa vie (Heathcote, 2002).
- La texture de surface, les BTC à surface rugueuse seraient plus érodables que les BTC à surface lisse (Crowley, 1997).
- Le revêtement de surface par un enduit protecteur améliore la durabilité (Patty, 1936 ; Crowley, 1997 ; Heathcote, 2002).

I.3.3 Stabilisation

Les constructions en terre présentent une vulnérabilité élevée face aux phénomènes d'érosion liés aux pluies, vents ou gels. L'enjeu est donc de les préserver en utilisant des techniques de stabilisation. La stabilisation a pour objectif d'améliorer la dureté (i.e., résistance aux chocs et aux frottements, réduction de l'effritement) et l'imperméabilité. Cependant un stabilisant ne remplace pas l'action du liant principal qui est l'argile (Rigassi, 1995).

La stabilisation de la terre consiste à lui donner des propriétés physiques « irréversibles ». Elle se fait en fonction de la conception du bâtiment, de l'économie du projet, de la durabilité et de la qualité du matériau. Il existe plus d'une centaine de produits stabilisants de la terre à bâtir. À chaque variété de terre correspond le(s) stabilisant(s) approprié(s) (Rigassi, 1995).

Il existe 3 procédés de stabilisation.

- La stabilisation mécanique consiste à modifier les propriétés de la terre en agissant sur sa structure et plus particulièrement sur sa porosité, perméabilité, densité et compressibilité (Houben et Guillaud, 1989). Au niveau de la porosité, la stabilisation réduit le volume des vides entre les particules ainsi que les variations de volume du matériau (gonflement-retrait à l'eau). En ce qui

concerne la perméabilité, la stabilisation agit en colmatant les vides. Cela améliore la résistance à l'érosion (du vent et de la pluie). La stabilisation améliore les liens entre les particules, ce qui augmente la résistance à la compression (Rigassi, 1995).

- La stabilisation physique consiste à modifier la texture de la terre en mélangeant des grains de tailles différentes (Rigassi, 1995).
- La stabilisation chimique consiste à mélanger la terre à d'autres matériaux ou des produits chimiques (Rigassi, 1995).

La stabilisation n'est pas une obligation. Elle n'est, par exemple, pas nécessaire lorsque le matériau n'est pas exposé à l'eau. Elle a en outre un coût important sur le prix de revient du matériau. Elle doit de ce fait tenir compte « *des propriétés de la terre à stabiliser, des améliorations à envisager, de l'économie du projet et des délais de réalisation, de la maintenance et de son coût, des techniques de construction mises en œuvre* » (repris dans Houben et Guillaud, 1989).

Il existe plusieurs moyens de stabiliser la terre :

- une manipulation mécanique permet d'évacuer l'air. Elle se fait en pétrissant la terre pour la rendre plus homogène et en la comprimant ;
- un ajout de fibres animales, végétales, synthétiques permet de donner une armature à la terre. Ce moyen de stabilisation améliore la résistance à la traction et au cisaillement, et réduit le retrait du matériau terre en créant un réseau de fibres omni-directionnel ;
- un ajout de « liant » à la terre. Celui-ci agit en enrobant les grains et en empêchant leurs mouvements. C'est généralement le ciment portland ou certaines colles et résines ;
- un ajout d'une matrice qui interagit avec la fraction argileuse. En fonction des charges positives ou négatives des argiles ou de leur composition chimique, certains stabilisants chimiques (polymères, floculants, quelques acides) peuvent lier les plaquettes argileuses entre elles ou jouer le rôle de catalyseur de cette liaison. D'autres stabilisants tels que la chaux interagissent avec les particules argileuses par réaction pouzzolanique. Ils réagissent avec l'argile en formant un nouveau matériau insoluble et inerte par précipitation. La cinétique de cette dernière réaction dépend de la quantité et de la qualité d'argile ;
- une imperméabilisation de la matière en remplissant les pores et les fissures par une matière insensible à l'eau telle que le bitume, ou par une matière gonflante comme la bentonite qui au contact avec l'eau va s'expander et empêcher l'accès aux pores ;
- un ajout des produits chimiques (acides, amines, résines) pour réduire la sensibilité des plaquettes d'argile à l'eau (CRAterre et al., 1979 ; Houben et Guillaud, 1989 ; Rigassi, 1995).

Il existe plusieurs « stabilisants » de la terre à bâtir :

Les sables et graviers permettent de structurer la terre trop argileuse en donnant un squelette au matériau. L'argile joue alors le rôle de liant. L'ajout de sable ou de gravier à la terre est donc un procédé de stabilisation physique qui modifie la granulométrie de la terre afin d'améliorer sa compacité (GATE, 1994). Il permet également d'utiliser moins d'argile et ainsi d'épargner les gisements.

Les fibres sont utilisées pour apporter une armature à la terre. Elles sont d'origine animale (poils et crins de bétail), végétale (les pailles, les balles de céréales, le chanvre, les fibres de noix de coco, de palmier, ...) ou synthétique (acier, fibres de verre, cellophane). La paille est la fibre la plus employée pour stabiliser la terre. Elle s'adapte à l'état plastique, visqueux, et même à la compression. Elle réduit la fissuration au séchage et augmente la résistance à la traction. Elle contribue à la résistance de la terre à l'échelle du grain, mais n'interagit pas directement avec les plaquettes d'argile, à l'échelle microscopique (Houben et Guillaud, 1989).

L'ajout des fibres permet :

- « d'empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- d'accélérer le séchage grâce aux canaux de fibres qui agissent comme un drainage de l'humidité vers l'extérieur. Inversement la présence de fibres augmente l'absorption d'eau;
- d'alléger le matériau en allégeant sa masse volumique et en améliorant ses propriétés d'isolation ;
- d'augmenter la résistance à la traction » (repris dans Houben et Guillaud, 1989).

L'efficacité de la stabilisation aux fibres dépend des caractéristiques de la terre et des interactions entre les fibres et la terre. La terre stabilisée aux fibres présentera une bonne résistance à la fissuration, au cisaillement, et à la compression, et une meilleure capacité d'absorption d'énergie sismique (Houben et Guillaud, 1989 ; Galán-Marinet al., 2010). Certains paramètres sont néfastes à la stabilisation aux fibres (Houben et Guillaud, 1989). Il convient d'éviter, une quantité trop importante de fibres pour ne pas diminuer les points de contact entre les fibres et la terre et diminuer donc la résistance du matériau. L'orientation des fibres est importante : les fibres doivent être placées dans toutes les directions.

Le bitume est un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Il doit être mélangé à des solvants (gasoil, kérone, naphta) ou à l'eau pour être utilisé comme stabilisant. Il permet d'imperméabiliser en entourant les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et fissures. L'emploi du bitume comme stabilisant reste limité (Houben et Guillaud, 1989).

Les résines dérivent souvent de substances végétales comme par exemple de résidus du traitement du bois au cours de la fabrication de la pâte à papier. La résine est un hydrophobant qui réduit la sensibilité de la terre à l'eau (Houben et Guillaud, 1989).

Le ciment est considéré comme un liant inorganique, et le meilleur stabilisant des BTC (Houben et Guillaud 1989). Le ciment permet d'enchaîner : il crée une liaison inerte qui s'oppose à tout mouvement. Il améliore la résistance à l'eau en créant des liens entre les particules de sables et graviers. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres sableuses (Rigassi, 1995). Cinq ou 6% de ciment suffiraient pour avoir des résultats satisfaisants (Rigassi, 1995). La stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait et du gonflement et nécessite peu d'eau. Le ciment diminue cependant la conductivité thermique de la terre. Plus il y aura de ciment dans un bloc de terre, plus la conductivité thermique se rapprochera de celle du ciment (Baffoue et al. 1997; Agridoc, 2004). L'inconvénient du ciment demeure son coût de production élevé et la nécessité des gisements calcaires.

La présence d'oxydes de fer (i.e., terres latéritiques) qui favorisent les réactions pouzzolaniques ou un indice de plasticité faible < 20 % (i.e., terres sableuses) sont des paramètres d'efficacité pour l'utilisation du ciment. Par contre, la matière organique, une eau chargée en sel, la présence des sulfates ou une terre trop argileuse (> 20 % d'argile) seraient des paramètres néfastes à l'utilisation du ciment comme stabilisant (Houben et Guillaud, 1989 ; Rigassi, 1995).

La chaux permet de former des liaisons chimiques stables entre les particules d'argiles. La chaux aérienne vive (CaO) ou la chaux éteinte Ca(OH)_2 sont utilisées pour les travaux routiers. Elles réagissent positivement avec les terres argileuses et nécessitent une teneur en eau relativement élevée qui dépend de la quantité de chaux utilisée. La chaux interagit avec les argiles et peu avec les sables. En général, la chaux ne convient pas pour la stabilisation des BTC qui nécessitent peu d'eau et des terres sableuses (GATE, 1994). La chaux aérienne diminue le retrait et le gonflement, augmente la résistance à la compression, diminue la sensibilité à l'eau,

la masse volumique sèche et la plasticité (GATE, 1994 ; Rigassi, 1995). La chaux nécessite des gisements calcaires mais demande moins d'énergie que le ciment pour sa fabrication.

Il existe un dosage optimal pour chaque terre. La quantité de chaux pour stabiliser la terre est de l'ordre de 6 à 12 % en général (Rigassi, 1995 ; Agridoc, 2004). Une terre argileuse (jusqu'à 70%) est favorable à l'utilisation de la chaux. Par contre, la présence des sulfates ou de matière organique est néfaste (Houben et Guillaud, 1989 ; Rigassi, 1995).