



**HAL**  
open science

## La terre coulée armée : grains, fibres et armatures

Abriseth Hernandez

► **To cite this version:**

Abriseth Hernandez. La terre coulée armée : grains, fibres et armatures. Sciences de l'Homme et Société. 2014. dumas-03035795

**HAL Id: dumas-03035795**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03035795>**

Submitted on 2 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **La terre coulée armée:**

**Grains, fibres et armatures**



école nationale supérieure d'architecture de grenoble

## **Abriseth HERNANDEZ**

Directeur d'études : Olivier Moles et Martin Pointet

Jury : Olivier Moles, Martin Pointet,  
Patrick Ribet,  
Wilfredo Carazas Aedo,  
Philippe Garnier

**Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement  
– mention patrimoine – Architecture de Terre 2012-2014**

Ministère de la Culture et de la Communication

# Sommaire

	7	Introduction
Chapitre 1	11	1 La terre : matière en grains
	12	1.1 Caractéristiques de la terre
	13	1.2 Propriétés mécaniques
	17	1.3 Changer les propriétés d'une terre
	17	1.3.1 Mise en œuvre et structure de la terre
	17	1.3.2 La reformulation des terres
	19	1.3.3 La stabilisation physico-chimique
	20	1.3.4 Les fibres dans la masse
Chapitre 2	25	2 La terre coulée
	26	2.1 La terre coulée
	27	2.2 La mise en œuvre
	31	2.3 Formulation de la terre coulée
Chapitre 3	39	2.4 La terre coulée dans le monde
Chapitre 4	41	3 La terre armée
	67	4 La terre coulée armée
	68	4.1 Pistes de réflexion sur le renforcement parasismique
	70	4.2 Low tech et High tech
	71	4.3 Typologies de renforcement pour la terre coulée
	91	4.4 L'expérimentation
	99	Conclusion
	103	Bibliographie
	109	Glossaire des techniques constructives en terre
	111	Annexe 1 La conception parasismique
	125	Annexe 2 C2C2 Béton d'argile Environnemental (B.A.E.)
	135	Annexe 3 Des projets en terre coulée

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Olivier et Martin pour leur encadrement et leurs apports à ce mémoire. Pour leur temps, questions, commentaires et observations. Je suis très reconnaissant des apports, commentaires et observations que Wilfredo Carazas a fait de mon travail. Je remercie beaucoup à Florent Vieux-Champagne pour les observations et suggestions. Pour son temps, son aide, ses corrections et ses commentaires. Je remercie beaucoup à également à Magali Aupicon pour son temps et ses corrections. Je tiens à remercier Patrice Doat pour m'avoir mis en relation avec Florent Vieux-Champagne et nous avoir animé à la réalisation des murets en terre coulée. Merci également à Philippe Garnier pour son support dans la réalisation des murets. Je remercie énormément à Florent

Vieux-Champagne, Julien Morin, Arnaud Berger, Arthur Lefebvre, Enrique Sevillano, Etienne Samin et Mauricio Corba pour leur temps pendant la réalisation des murets. Je suis très reconnaissant du support, écoute, commentaires et suggestions de Hugo Gasnier. Merci beaucoup à Murielle Serlet pour toutes les documents et livres qu'elle m'a facilités. Je remercie énormément à toute l'équipe de CRAterre pour son enseignement et l'organisation de ce DSA terre. Je remercie beaucoup à Jacques Morin et Alvaro Olmos pour son aide dans la préparation du dossier d'admission au DSA. Je remercie énormément à l'architecte Michael Frerking, Satprem Maïni, Francis Kéré, Luis Fernando Guerrero Baca, Elena Ochoa, Marcelo Cortés et à l'ingénieur Paul Jaquin pour leur information propor-

tionnée et leur temps. Je remercie énormément à Roberto Sandoval, Rafael Barroso, Dolores Hayeck, Alfonso Hayeck, Silvia van Dijk et Cornelio Hoogesteger pour son support inconditionnel. Merci également à Daniel Maldonado, Jorge Bernal et Ana Flores pour son soutien. Je suis très reconnaissant du support du support financier dans l'année 2000, qui m'a permis d'avoir un premier séjour en France et d'apprendre le français. Je tiens à remercier COCYTEN et CONACYT pour le support financier avec lequel j'ai pu réaliser cette DSA. Finalement je remercie énormément à ma famille, Rosario et Rosseth pour leur support, aide et temps pendant la réalisation de ce mémoire.

# Introduction

La terre coulée a des points communs avec le béton de ciment conventionnel, leur mise en œuvre est similaire, on peut utiliser les mêmes machines et les mêmes savoirs faire. La différence entre ces deux matériaux est que la terre coulée nécessite moins de ciment, voir même, dans certaines circonstances, pas de ciment du tout. C'est donc une potentielle technique de substitution à faible impact environnementale, très pertinente dans le contexte climatique actuel. Il y a un intérêt croissant pour la terre coulée en France, aux États Unis, en Inde, en Australie, en Nouvelle Zélande, au Mexique, de plus en plus de pays lancent des recherches et expérimentations sur ce sujet !. La terre coulée semble ouvrir de nouveaux champs architectoniques tout comme le béton de ciment à ces débuts. Mais, peut-on construire partout en terre coulée ? Est-ce pertinent ? Même dans des zones sismiques ? Avec quels critères, principes et règles de conception doit-on penser et construire en terre coulée ? Ce mémoire est une réflexion sur les potentialités mécaniques de la terre coulée armée. Quels types d'armatures peuvent être utilisées, et comment la terre coulée armée pourrait avoir des performances mécaniques augmentées ?

Dans les villes et les endroits où la terre comme matériau de construction a déjà complètement disparu, la terre coulée pourrait être une nouvelle porte d'entrée

pour la construction en terre, en modifiant le regard et l'image négative de la terre. Elle pourrait devenir un substitut au béton conventionnel mais aussi devenir un complément pour d'autres techniques constructives en terre, de par son utilisation dans certains éléments constructifs, où d'autres techniques ont leurs limites.

La terre coulée est encore au niveau expérimental. Nous en sommes à ses débuts. Les sources d'informations, les recherches, les connaissances, les expériences sur le sujet ainsi que le nombre de personnes impliquées sont encore minimales. Néanmoins, on peut déjà trouver quelques constructions dans les pays mentionnés.

Une des questions centrales dans la terre coulée est la formulation. Nous commençons à savoir formuler une terre coulée.

Les variables à prendre en compte sont multiples et nous sommes en train de comprendre la relation entre chaque paramètre. Chaque formule à ses caractéristiques propres, qui dépendent de la terre et de chaque composant utilisé. Chaque formulation est donc très localisée. Chaque terre nécessite une formulation différente et de nombreuses questions restent à résoudre, c'est pourquoi les réflexions de ce mémoire sont à caractère prospectif.

Le choix de ce sujet pour mon mémoire est né d'une curiosité envers cette technique constructive. Attiré par la terre coulée, j'ai fait mon stage chez l'entreprise Caracol Écoconstruction avec qui j'ai participé à deux chantiers de terre coulée : la rénovation d'une vieille grange en pisé à Paladru et le chantier de la Maison des Marais à Saint Omer.

Le point de départ de ce mémoire est de poser comme principe qu'il est possible de construire avec de la terre coulée dans des zones sismiques. Par ailleurs, il me semble que la conception d'une nouvelle construction en terre coulée se fait avec des critères, principes et règles empruntés à la conception du pisé, mais également avec les libertés offertes par le béton conventionnel.

L'étude des critères, principes et règles de conception parasismique du pisé et du béton conventionnel peut dévoiler des pistes pour la conception des systèmes constructifs parasismiques en terre coulée.

Force est de constater que l'on peut faire augmenter la résistance mécanique d'une terre si : on la compacte ; on optimise sa granularité ; on lui ajoute un stabilisant physico-chimique ; on lui ajoute des fibres. De plus, si on arme les éléments constructifs, sa résistance mécanique continue d'augmenter. Après avoir détaillé ce constat, je présenterai mes

réflexions sur le renforcement de la terre coulée.

Ma démarche a commencé par une prise d'informations sur la conception parasismique en général et sur la conception parasismique de la construction en terre en particulier, en me référant à des projets de construction en terre en zone sismique et en étudiant tous les types de renforcement qui déjà utilisés pour la terre armée. J'ai imaginé quels types de renforcement, existants ou innovants, pourraient être utilisés pour la terre coulée. J'ai effectué des essais de mise en œuvre de trois types de renforcements différents sur des murets expérimentaux en terre coulée. Pour finir, j'ai préparé et entamé des essais de charge cyclique sur les murets réalisés. Ces essais sont en cours de réalisation. Ils permettront de connaître le comportement dynamique de la terre coulée et l'influence des trois types de renforcement utilisés sur la résistance des murs.

Le mémoire est constitué en quatre parties. Les trois premières constituent le constat sur lequel j'appuie les réflexions de la dernière.

Le premier chapitre se concentre sur l'étude des propriétés mécaniques de la terre et comment les résistances mécaniques augmentent au travers de sa mise en œuvre, sa reformulation, la stabilisation

physico-chimique et l'ajout des fibres dans la masse.

Dans un deuxième chapitre, nous analyserons les ressemblances entre la mise en œuvre de la terre coulée et celle du béton conventionnel.

J'y traite la formulation de la terre coulée et je nomme les personnes qui construisent en terre coulée dans le monde.

Les annexes 2 et 3 complètent ce chapitre.

Le troisième chapitre présente l'état de l'art, non exhaustif, de la terre armée, sous forme d'un résumé graphique des typologies de renforcement existantes et sous forme de fiches de projet. L'annexe 1 est un complément de ce chapitre.

Enfin, le dernier chapitre propose une réflexion sur les éléments à considérer pour concevoir des systèmes constructifs parasismiques en terre coulée. Je propose de nouvelles typologies de renforcement qui pourraient être utilisées dans la terre coulée, les matériaux utilisés et leurs possibles performances face aux secousses sismiques.

Finalement je détaille la réalisation des huit murets en terre coulée possédant trois types de renforcement différents. Ces murets ont été réalisés lors du festival Grains d'Isère en mai 2014 et différents tests sont aujourd'hui en cours.

**La terre coulée armée**

DSA-Architecture de terre 2012-14: Abriseth HERNANDEZ

**La terre : matière en grains**



# 1.1 La matière en grains

Hugo Houben et Hubert Guillaud dans le «Traité de construction en terre» publié en 1989 font un véritable travail de synthèse des connaissances actuelles sur la construction en terre. Ils exposent, entre autres sujets, les connaissances scientifiques de la terre comme matériau de construction.

Dans sa thèse, « Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction », Romain Anger collecte les connaissances en sciences de matériaux pour expliquer la physique des milieux granulaires secs et la physique des milieux

granulaires humides afin de décrire les comportements physiques de la terre comme une matière en grains (Anger, 2011).

Il y a une infinité de sortes de terre avec des caractéristiques différentes. Une terre est une matrice de grains, d'eau et d'air. Chaque terre a des propriétés qui la caractérisent. «D'une terre à une autre terre, les propriétés peuvent être très variables» (Houben, Guillaud, 2006, 41p). Selon la proportion respective et la répartition de ces constituants, les propriétés d'une terre changent.

Les principales propriétés de la terre sont listées dans la fig. 1. Pour ce mémoire on va s'intéresser surtout aux propriétés mécaniques de la terre, dû à que je vous montrais au long du mémoire comment ses propriétés augmentent avec la mise en œuvre, l'optimisation granulaire, la stabilisation physico-chimique, l'ajout des fibres dans la masse et finalement avec l'inclusion des armatures dans la masse des éléments constructifs. On traitera en plusieurs détails toutes ces questions dans les sections suivantes de ce chapitre et dans les prochains chapitres.

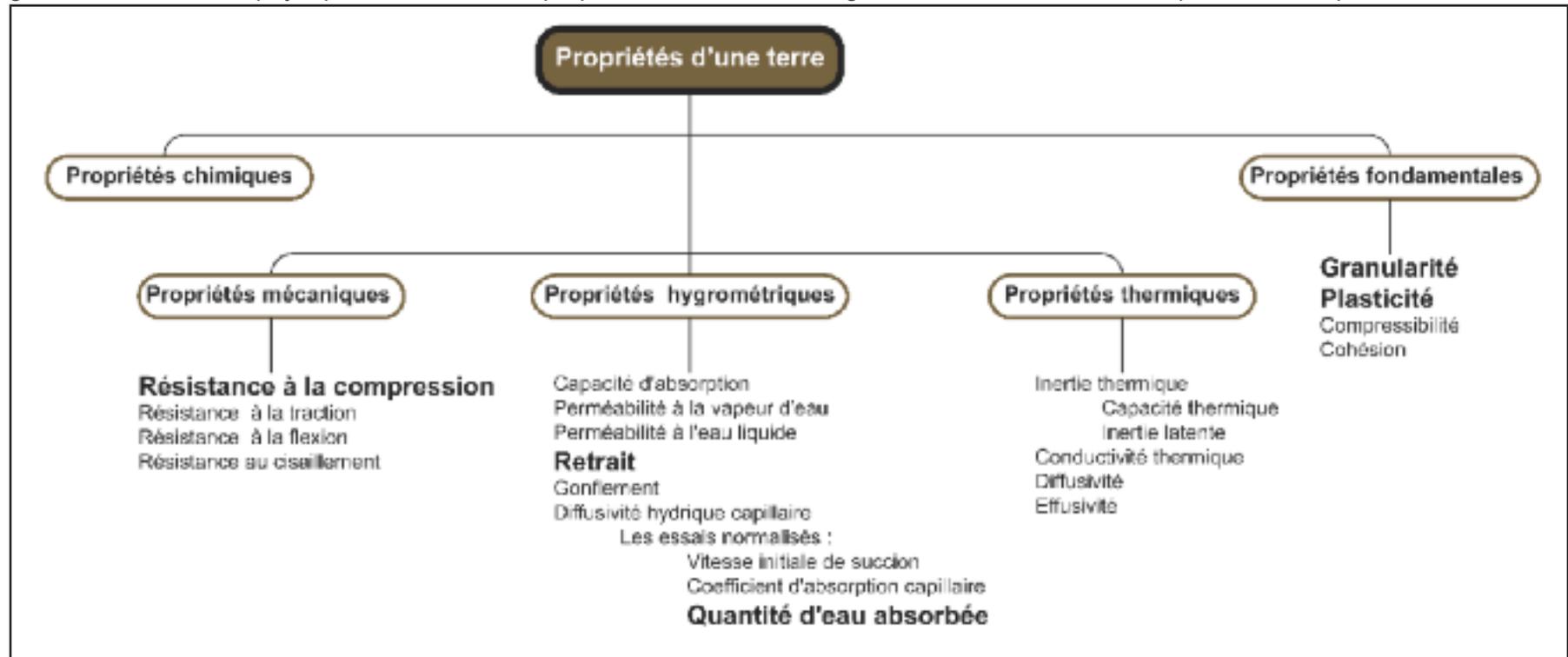


Fig. 1 Principales propriétés de la terre.

Dans le cas de la section 2.2 quand je touche le sujet de la formulation de terre coulée, je ferais surtout référence aux propriétés suivantes : résistance à la compression, retrait, diffusivité hydrique capillaire, granularité et plasticité.

La structure de la terre est le mode d'assemblage de ses constituants à un instant donné. La texture de la terre est sa composition granulaire.

Les constituants minéraux de la terre sont classifiés selon leur taille comme:

Cailloux: de 200 à 20 mm

Graviers: de 20 à 2 mm

Sables: de 2 à 0.06 mm

Silts: de 0.06 à 0.002 mm

Argiles: au dessous de 0.002 mm

La prédominance d'une taille de grains joue sur le comportement général d'une terre, il existe des terres graveleuses, sableuses, silteuses ou argileuses. Les cailloux, graviers, sables et silts, sont des fragments de roche mère avec une composition minérale identique à la roche mère. Ils sont devenus des grains de différentes tailles par des processus très lents de dégradation, dus à l'érosion et à des facteurs climatiques. (Houben, Guillaud, 2006)

Les argiles «résultent d'une altération chimique des minéraux de la roche mère.

Chimiquement, ce sont des aluminosilicates hydratés formés au cours du processus de lessivage des particules grossières de minéraux rocheux primaires»(Houben, Guillaud, 2006, 34-

35p). Il y a un grand nombre d'argiles différents, néanmoins les trois types les plus fréquents sont la kaolinite, l'illite et la montmorillonite. La chlorite, muscovite, halloysite, vermiculite, sepiolite, attapulgite sont d'autres argiles. Chaque argile a des caractéristiques et des comportements physico-chimiques qui lui sont propres. Dans une terre c'est l'argile et l'eau qui travaillent comme liant, collant les autres particules du sol entre elles. Chaque argile a une nature cohésive différente. Romain ANGER fait une description du comportement physico-chimiques des divers argiles, voir (Anger, 2011).

C'est donc la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de silts, d'argiles, d'eau, et d'air; et le type d'argile présent dans une terre, qui vont lui donner ses propriétés. La fig. 2 montre comme exemple la granulométrie d'une terre à pisé de la carrière de Brézins, en Isère. La quantité des grains par taille est exprimée en pourcentage. Pour cette terre de Brézins, elle est de:

20.11% Cailloux

32.50% Graviers

19.80% Sables

17.60% Silts

9.90% Argiles

En juin 2012, issue d'une recherche sur la littérature scientifique, Mariette Moevus, Laetitia Fontaine, Romain Anger présentent un bilan des caractéristiques mécaniques, thermique et hygrométrique des techniques constructives en terre crue. (Moevus,

B.A.E., 2013). Je tire de ce document quelques informations et données. La fig. 3 (Ibid.) montre un tableau récapitulatif des principales propriétés de la terre mise en œuvre comme pisé, BTC, adobe, bauge et terre allégée. Pour les mêmes techniques constructives la fig. 4 montre la teneur en argiles des terres utilisées pour chaque technique, l'indice de plasticité et la teneur en eau de la terre au moment de sa mise en œuvre (teneur en eau initiale) et la masse volumique que les murs construits peuvent atteindre.

Ensuite, je vous présente les données des propriétés mécaniques de la terre en tant que matériaux de construction. Les autres propriétés de la terre ne sont pas traitées dans ce mémoire.

## 1.2 Propriétés mécaniques

Selon Vincent Mollion: "La terre a un comportement élasto-plastique. ..., comporte un très faible domaine linéaire élastique, puis lorsque la charge augmente la pente de la courbe diminue progressivement. Si l'on effectue des cycles de décharge – recharge, on observe des déformations résiduelles caractéristiques d'un comportement plastique, et des boucles d'hystérésis de plus en plus larges avec la charge de préconsolidation"1 (Ibid. 36p.)

1 MOLLION, Vincent, étude du comportement mécanique du pisé, rapport master, ENTPE, 2009, 115 p.

## Granulométrie de la terre à piser

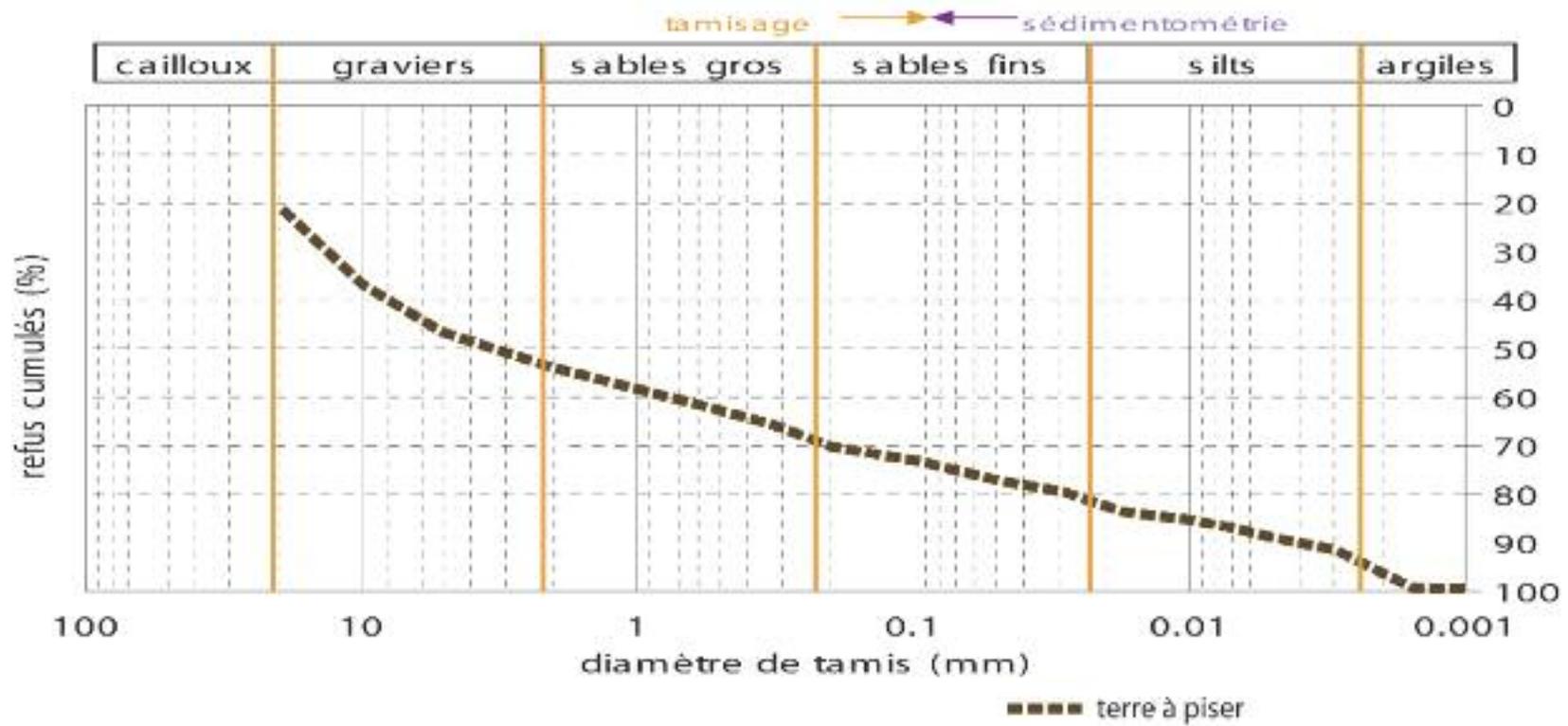


Fig. 2

## Les principales propriétés de la terre comme matériau de construction.

Propriété	Unité	Terre compactée	Terre moulée	Terre allégée
Teneur en argiles	%	5 à 30	20 à 40	
Indice de Plasticité $IP$	%	5 à 30	15 à 35	
Teneur en eau initiale $w_{ini}$	%	5 à 15	15 à 35	
Masse volumique sèche $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1600 à 2200 <i>(1700 à 2200)</i>	1200 à 2100 <i>(1200 à 1700 pour l'adobe)</i>	300 à 1200 <i>(600 à 800 pour le terre-paille)</i>
Teneur en eau ambiante $w$	%	0 à 5%		
Retrait de séchage	%	1 à 3 <i>(0,02 à 0,1 pour le BTC, 0,1 à 0,2 pour le pisé)</i>	1 à 20 <i>(0,02 à 0,1 pour l'adobe)</i>	proche de 0
Coefficient de résistance à la vapeur $\mu$		5 à 20		
Module de Young $E$	GPa	1,0 à 6,0 <i>(0,7 à 7,0 pour de la terre stabilisée)</i>		< 1,0
Résistance à la compression $R_c$	MPa	0,4 à 3,0 <i>(2,0)</i>	0,4 à 5,0	
Résistance à la traction $R_t$	MPa	0,1 à 0,5 <i>(0,5 à 1,0 pour la terre compactée)</i>		
Capacité thermique massique $c$	J/kg.K	600 à 1000 <i>(~ 850)</i>		
Capacité thermique volumique $C$	kJ/m <sup>3</sup> .K	960 à 2200	720 à 2100	180 à 1200
Conductivité thermique $\lambda$	W/m.K	0,5 à 1,7 <i>(0,81 à 0,93)</i>	0,3 à 1,5 <i>(0,46 à 0,81)</i>	0,1 à 0,3 <i>(0,1 à 0,45)</i>

Fig. 3 Cadre qui présente les principales propriétés de la terre comme matériau de construction. Entre parenthèses, en bleu se montre les valeurs données dans le Traité de Construction en terre. (Moëvus, B.A.E., 2013)

Le module de Young de la terre crue, comme matériau de construction, est d'autant plus élevé que la porosité et la teneur en eau sont faibles, et la teneur en argiles et la surface spécifique sont élevées. Les valeurs trouvées vont de 1-6GPa.

La résistance à la traction est très faible, les mesures vont de l'ordre de 0,1 à 0,5 MPa.

La résistance à la compression est une donnée importante pour déterminer l'épaisseur des murs en terre. On trouve des valeurs qui situées entre 0,4 et 5MPa. Néanmoins la valeur moyenne du pisé est de 1,5MPa et peut aller de 0,4 à 3MPa. On peut faire augmenter la résistance à la compression d'une terre en augmentant sa densité et sa teneur en argile et silt (jusqu'à un certain seuil), et en diminuant sa teneur en eau. «Plus la teneur en eau est élevée, plus la résistance en compression est faible, ... A contrario, plus la teneur en eau est faible et plus la résistance en compression est élevée, ...» (Ibid.)

La variation de la teneur en eau est en relation avec les forces capillaires, les frottements entre les grains et l'intensité des liaisons physico-chimiques entre plaquettes argileuses qui influencent la résistance mécanique du matériau.

Quand chaque grain d'une certaine taille remplit les interstices des grains de taille supérieure, on obtient un empilement apollonien avec un matériau plus dense, avec des forces de frottement plus fortes.

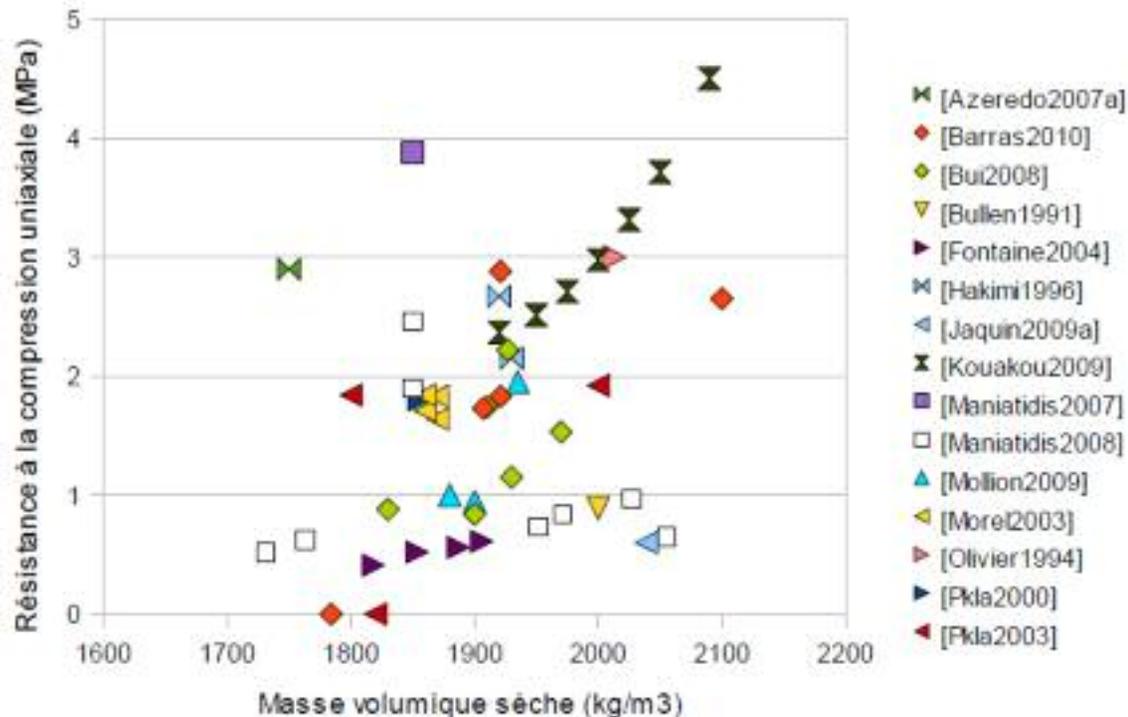


Fig. 4 Ce graphique montre les valeurs de la résistance à la compression des divers auteurs. (Moevus, B.A.E., 2013)

Technique	% argile	Indice de plasticité (%)	Teneur en eau initiale (%)	Masse volumique sèche (kg/m³)
<b>pisé BTC</b>	5	5	5	1600
	à 30	à 30	à 15	à 2200
<b>adobe mortier bauge</b>	20	15	15	1200
	à 40	à 35	à 35	à 2100
<b>terre allégée</b>				300
				à 1200

Fig. 5 Tableau de différentes techniques constructives en terre avec quelques de leurs caractéristiques. (Moevus, B.A.E., 2013)

## 1.3 Changer les propriétés d'une terre

Dans cette section, je présente tout d'abord comment la mise en œuvre peut changer les propriétés d'une terre. Je continue avec l'apport de la reformulation et la stabilisation physico-chimique d'une terre dans le changement de ses propriétés. Ensuite je présente le changement des propriétés par l'ajout des fibres dans la masse. Finalement je montre brièvement, les résultats de quatre recherches sur les propriétés mécaniques des terres fibrées.

Comme nous l'avons déjà vu, chaque terre a ses propres caractéristiques. Selon ses propriétés, on pourra l'utiliser dans une ou plusieurs techniques constructives. Sans changer la granularité d'une terre, au travers de sa mise en œuvre, on la transforme en matériau de construction.

On peut également changer les propriétés d'une terre si on modifie sa granularité, par l'ajout de certaines substances et par l'ajout de fibres. Cette addition à une terre, implique la création d'un matériau de construction, avec des propriétés différentes de notre terre source. On crée des matériaux de construction à base de terre. Voyons plus en détails les possibilités de modification des propriétés d'une terre.

### 1.3.1 Mise en œuvre et structure de la terre

En laissant la granularité d'une terre intacte, on peut changer sa structure par sa mise en œuvre. Elle nous permet de jouer sur les variables air et eau de la terre. L'augmentation ou diminution d'eau ou d'air, change la structure d'une terre. Différents pourcentages d'eau et d'air dans la structure d'une terre, donne comme résultat des configurations grains-air-eau différentes. On change ainsi les caractéristiques d'une terre. L'architecte Wilfredo Carazas membre de CRAterre a conçu un essai nommé «Test Carazas». C'est un outil très puissant pour montrer les possibilités constructives d'une terre en jouant avec les quantités d'eau et d'air d'une terre. L'essai consiste à mélanger une terre avec différentes quantités d'eau. Pour chaque teneur en eau, on verse dans trois moules une quantité de terre précise. Dans le premier moule on la verse tout simplement. Dans le deuxième moule on la tasse au fur et à mesure avec la main. Et dans le troisième moule on la tasse avec une petite dame pour bien comprimer la terre. On fait augmenter la teneur en eau du mélange suivant et on répète le remplissage des trois moules. On continue à augmenter la teneur en eau jusqu'à trouver l'état liquide des mélanges. On obtient de cette façon une palette d'échantillons qui montrent les

effets de la quantité d'eau et d'air dans la mise en œuvre d'une terre. Avec les résultats qu'on obtient, on peut juger la pertinence de modes d'utilisation d'une terre.

La mise en œuvre peut donc modifier certaines propriétés d'une terre qu'on utilise pour construire. Les propriétés susceptibles de changer sont la stabilité structurale, la masse volumique apparente, la porosité, le potentiel capillaire, la diffusion capillaire, la perméabilité, le retrait linéaire et la résistance sèche. Le pisé est une technique pour laquelle les propriétés mentionnées changent au travers du damage de la terre à piser.

### 1.3.2 La reformulation des terres

On peut aussi changer les propriétés d'une terre si on modifie sa granularité. Si on ajoute à une terre une quantité de sable ou de gravier par exemple, on obtient un nouveau matériau avec une texture différente. Les possibilités d'arrangement de ses grains, sont aussi différentes, donc ses propriétés changent. Si comme deuxième exemple on mélange deux terres, leurs granularités vont donner comme résultat une nouvelle granularité. On crée un matériau de construction à partir de la reformulation d'une terre. Si par exemple, on veut faire un enduit



Fig. 6 Échantillons du « Test Carazas ». La première ligne correspond à la terre simplement versée dans les moules. La deuxième au tassement avec la main, et la troisième au tassement avec une petite dame. (Le Tiec, Paccoud, 2006)

avec une terre, il est possible de faire un premier essai en utilisant la terre tamisée sans rien lui ajouter. Si l'échantillon présente des fissures en séchant, cela indique la présence du retrait dans la terre choisie. Par la suite on fera des nouveaux essais en ajoutant différents pourcentages de sable. Ceci est une façon de corriger le retrait d'une terre pour les enduits. Au vue

des résultats, on jugera quel pourcentage de sable convient le mieux à notre terre. En utilisant la même terre le pourcentage de dosage peut changer d'un sable à autre. La reformulation de terres est très pratiquée dans les enduits. Elle est traditionnellement pratiquée pour la fabrication d'adobes (sans être forcément la règle), avec l'ajout d'autres matériaux.

Actuellement on peut utiliser la reformulation pour faire du pisé dans tous les régions du globe, comme le montre dans son mémoire Hugo Gasnier et Quentin Chansavang, intitulé «Un approche prospective du pisé» (Chansavang, Gasnier, 2012)

### 1.3.3 La stabilisation physico-chimique

«Les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées considérablement grâce à l'ajout de stabilisants. Mais, à chaque variété de terre correspond le stabilisant approprié. On dénombre à ce jour plus d'un centaine de produits employés pour la stabilisation des sols ou des terres à bâtir» (Houben, Guillaud, 2006, 79p)

Les stabilisants les plus connus sont le ciment, la chaux et le bitume. On peut aussi utiliser du plâtre, oxyde de magnésium et des cendres volantes. Ou bien des substances naturelles comme la colle à farine, le jus de cactus, la bouse de vache, la cellulose etc.

#### 1.3.3.1 Ciment

La stabilisation de la terre au ciment a commencé dès 1915 dans le domaine routier aux États Unis. Dans la construction de bâtiment en Allemagne dès 1920. Dès 1935, le sol-ciment a été de plus en plus employé. Il est de nos jours un matériau parfaitement maîtrisé. (Houben, Guillaud, 2006)

Il est possible de stabiliser au ciment presque toutes les terres, mais c'est avec

des terres sableuses qu'il est possible d'obtenir les meilleurs résultats. La terre stabilisée au ciment ne doit pas contenir plus de 2 à 3% de sulfates, spécialement le sulfate de calcium (anhydrite et gypse). La résistance à la compression d'une terre stabilisée au ciment est directement proportionnelle à la quantité de ciment. Les dosages dépendent de la texture et la structure d'une terre, ainsi que de la mise en œuvre. Entre un 6-12% de ciment est nécessaire pour avoir des résultats satisfaisant. Néanmoins il existe des terres qui présentent des bons résultats à 3% de stabilisation.

La stabilisation diminue les variations dimensionnelles d'une terre et la rend plus résistante à l'érosion.

Les ciments Portland ordinaires classe CEM 1 peuvent être utilisés pour la stabilisation des terres.

La stabilisation crée dans la terre trois structures mêlées: une matrice inerte sableuse liée au ciment; une matrice d'argile stabilisée; et une matrice de terre non stabilisée.

Le ciment a besoin d'eau pour réagir chimiquement. Pourtant la terre stabilisée au ciment a besoin de suivre une cure humide d'un minimum de 14 jours. La résistance d'un sol-ciment croît avec l'âge. La prise du ciment dure 28 jours. (Houben, Guillaud, 2006)

#### 1.3.3.2 Chaux

La stabilisation de la terre à la chaux a commencé aux États Unis dans le domaine routier à partir de 1920.

On préférerait alors la stabilisation avec des chaux aériennes (chaux vive et chaux éteinte) qu'avec des chaux hydrauliques. A poids égale la chaux vive (CaO) est plus efficace que la chaux éteinte (CaOH)<sub>2</sub> Les chaux hydrauliques naturelles (XHN) sont plus efficaces que les chaux hydrauliques artificielles (XHA).

Pour chaque terre il existe une teneur en chaux optimale, le plus courant est de stabiliser entre 6-12%.

La chaux réagit avec les argiles d'une terre, provoquant une réaction pouzzolanique.

On préfère stabiliser à la chaux quand il s'agit des terres argileuses.

La résistance d'une terre stabilisée à la chaux croît dans une durée beaucoup plus longue qu'avec le ciment. Cette augmentation peut durer parfois des mois. Une cure sous un film de plastique sous le soleil est suffisant. La résistance augmente avec le temps de cure. (Houben, Guillaud, 2006)

#### 1.3.3.3 Bitume

À l'origine, le terme "bitume" désignait un matériau naturel, fait d'un mélange d'hydrocarbures. Il a été utilisé comme stabilisant en Babylone au Ve siècle. Aujourd'hui, il désigne un produit composé de 40%

d'hydrocarbures et de filler, développé à partir de 1940 par les industries pétrolières aux États Unis.

La stabilisation au bitume a besoin de beaucoup d'eau pour obtenir une distribution homogène du produit, adapté aux adobes et aux enduits. Pour l'utiliser, le bitume doit être mélangé à des solvants ou dispersé dans l'eau en émulsion.

Le dosage courant est de 2-3% et peut monter jusqu'à 8%.

La résistance augmente avec la quantité du bitume jusqu'à un certain seuil. L'absorption d'eau dépend de la teneur en eau initiale et elle reste stationnaire dans le temps après séchage.

Il n'y a pas de cure humide pour la stabilisation au bitume. (Houben, Guillaud, 2006)

### 1.3.4 Les fibres dans la masse

La pratique d'ajouter des fibres dans la masse est très ancienne. Des adobes de l'Égypte pharaonique ont été trouvées avec des fibres en parfait état. Les fibres incluses dans la terre ne pourrissent pas quand le matériau est sec. Les plus utilisées sont les pailles de toutes espèces: orge, seigle, blé, escourgeon, lavande. D'autres fibres végétales sont le foin, chanvre, mil, bagasse, fibres de noix de coco, sisal, manille, herbe d'éléphant, fibres de palmier, de bambou, d'hibiscus. Débris du teillage du lin ou de chanvre. La balle de céréales: riz, blé, orge. Les copeaux et sciure de bois. Les fibres animales comme les poils et crins du bétail peuvent être utilisés. Ou même des fibres synthétiques comme le cellophane, acier, fibres de verre, etc. (Houben, Guillaud, 2006) Il y a peu d'études scientifiques du comportement de la terre renforcée avec des fibres dans la masse. Les dessins des pages 24-25 illustrent différentes fibres de manière à questionner leurs apports pour renforcer la terre.

On utilise les fibres pour renforcer des terres plutôt argileuses. On peut les utiliser dans des mises en œuvre à l'état liquide, plastique ou humide. Les fibres dans la masse augmentent la résistance à la compression, à la traction et au cisaillement de la terre, on obtient les meilleurs résultats avec la distribution omnidirectionnelle des fibres. La résistance dépend de la qualité et la quantité des fibres. La quantité ne doit pas dépasser un certain seuil, autrement le

matériau s'allège trop et la résistance commence à diminuer. Une teneur courante est 4% en volume, donc de 20-30kg/m<sup>3</sup>, avec des fibres entre 4-6cm de longueur. On peut augmenter de 15% la résistance à la compression avec l'ajout des fibres par rapport au matériau non renforcé. Les blocs renforcés aux fibres «peuvent subir une grande déformation car ils absorbent une quantité d'énergie appliquée assez élevée. Ceci rend leur emploi particulièrement intéressant dans les zones à risque sismique. L'ajout de fibres modifie fondamentalement le comportement des blocs au-delà du point de rupture. Le matériau non renforcé se brise en morceaux, les blocs armés de fibres restent d'une pièce et continuent à gagner en résistance à la compression souvent au-delà du point de rupture des blocs non armés. Les matériaux de terre renforcés de fibres possèdent un degré élevé de résistance à la fissuration et à la propagation de fissures. En effet, au niveau d'un plan de clivage potentiel, les fibres s'opposent au clivage au fur et à mesure de l'augmentation de la contrainte. Le degré de résistance au cisaillement dépend pour beaucoup de la résistance à la traction des fibres» (Houben, Guillaud, 2006, 88-89p.)

Les deux pages suivantes montrent brièvement 4 études sur la manière dont l'ajout des fibres change les propriétés mécaniques des matériaux fait à base de terre.

Castro et Naaman ont étudié l'influence du pourcentage de fibres d'agave dans un mortier au ciment. (Castro, Naaman, 1981) Ils ont réalisés des échantillons de 30 x 7,5 x 1 centimètres qui ont été soumis à un test de résistance à la flexion. La longueur des fibres utilisées a été de 5-7.5 cm. La fig. 7 montre les résultats. L'apparition de la première fissure n'est pas influencée significativement par la quantité de fibres. A partir de 7% de teneur en fibres la charge supportée a augmenté au-delà de la première fissure, donnant au matériau un comportement ductile. L'échantillon à 10% des fibres a montré être trois fois plus ductile que celui sans fibres. Il a été observé que les échantillons plus fibrés ont distribués les charges de façon favorable et ont pu supporter une augmentation des charges jusqu'au moment de la rupture.

Basé sur cette étude Webster a exprimé que le prolongement logique, est que l'incorporation des fibres naturelles dans la terre coulée, donnerait comme résultat un matériaux de comportement ductile. Il a mentionné que l'ajout des fibres dans la terre coulée est analogue à l'utilisation traditionnelle de la paille, mais que les fibres, en étant plus résistantes, donneraient des matériaux plus résistants pendant les séismes. (Castro, Naaman, 1981) (Webster, 1981)(May, 1981)

### Courbes Force-Déplacement de poutres renforcé avec des fibres de maguey

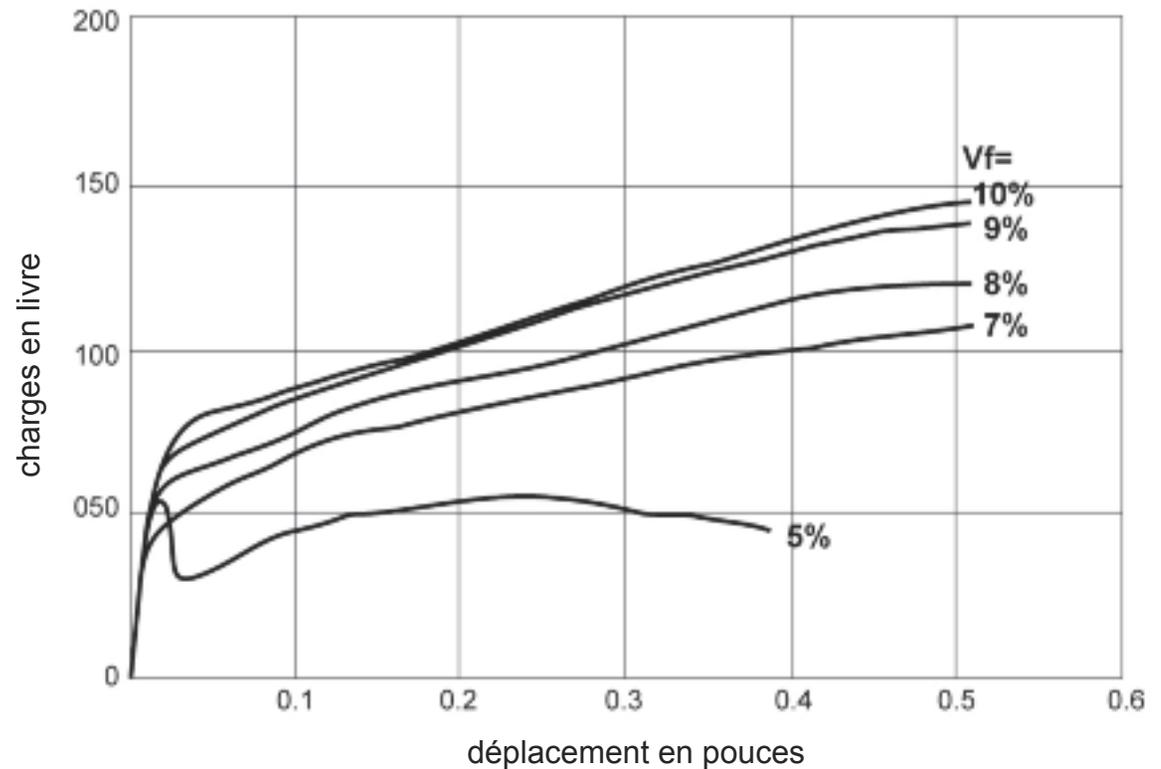


Fig. 7 Courbe Force-Déplacement des échantillons avec différents teneur en fibres. (Webster, 1981)

#### Fibres d'agave

Résistance à la traction = 275 – 482MPa = 40-70x10<sup>3</sup> psi  
 Module d'élasticité = 6894 – 11721MPa = 1.0 -1.7x10<sup>6</sup> psi

#### Fibres de polypropylène et polyester

Résistance à la traction = 344 – 551MPa = 50-80x10<sup>3</sup> psi

Imen Saadi et R. Belouettar du Laboratoire de Génie Civil de l'Université Badji Mokhtar à Annaba en Algérie, ont réalisé une étude sur le comportement mécanique des briques de terre crue renforcées aux fibres de palmier dattier et aux fibres de paille. Ils montrent que les fibres améliorent les propriétés mécaniques et la ductilité du matériau. Ils ont observé une teneur en fibres optimale de 2%. Les fibres de palmier dattier donnent une meilleure performance, due à l'adhérence entre les fibres et les granulats. Les fibres de palmier ont une surface rugueuse, alors que la paille a une surface lisse. (Saadi, Belouettar, 2011)

En 2012, Enokela et Alada ont réalisé une étude sur l'influence dans la résistance à la compression d'une terre renforcée avec des fibres de noix de coco. Ils ont testé quatre teneurs en fibres, du 1-4%, et un témoin à teneur sans fibres. Les résultats sont les suivants: à 0% de fibres Rc de 5,58KN/m<sup>2</sup>, 1% de fibres Rc de 7,94KN/m<sup>2</sup>, 2% de fibres Rc de 8,62KN/m<sup>2</sup>, 3% de fibres Rc de 6,81KN/m<sup>2</sup> et 4% de fibres Rc de 5,90KN/m<sup>2</sup>. On observe que avec 4% de teneur en fibre la résistance est similaire que le matériau sans fibre. (Enokela,Alada, 2012)

Eric W. Simenson pour obtenir son degré de «Master of Sciences» à l'Université de Colorado a étudié les effets des fibres de polypropylène dans le pisé stabilisé au ciment. Il a fait trois séries d'échantillons

cylindriques: terre à pisé, terre à pisé avec 6% de ciment, et terre à pisé avec 6% de ciment et 0,3% de fibres de polypropylène de 1/2". Il les a testées en compression et en cisaillement. Et il a fait les mêmes séries avec des échantillons rectangulaires qu'il a testés en flexion.

Vient ensuite le test de compression, les échantillons qui, avec de la terre ont eu une moyenne de 0,44MPa. Celles stabilisées au ciment ont montré une moyenne de 4,85MPa, onze fois plus résistantes que les précédentes. La moyenne des échantillons stabilisés au ciment et renforcés aux fibres a été de 4,88MPa. Les fibres dans cette série de test n'ont pas augmenté la résistance à la compression. Néanmoins elles ont induit un changement de comportement des échantillons: toute la masse de l'échantillon est maintenue ensemble après le point de rupture, sans laisser tomber aucun morceau (fig. 8). Par contre, les échantillons non renforcés laissent tomber 50% de sa masse juste après le point de rupture. Il a calculé le module de Young en 976,16MPa pour les spécimens stabilisés et en 986MPa pour les stabilisés et fibrés.

Les résultats du test au cisaillement montrent une augmentation de 10 fois la cohésion entre les échantillons non stabilisés et les stabilisés. Et un incrément de 15,5% a été observé entre les échantillons non fibrés et les fibrés. Les échantillons non stabilisés testés en flexion ont montré une moyenne de 0,03MPa. Les stabilisés une moyenne de

1MPa. Et les stabilisés et fibrés une moyenne de 1,04MPa. En flexion les fibres n'ont pas augmenté la résistance, mais ont modifié le comportement des échantillons au moment de la rupture. Les deux pièces de chaque spécimen sont restées ensemble après le point de rupture, et ont supporté une augmentation de charge. (Simenson, 2011)

Cette expérience montre un changement de comportements des éléments renforcés avec des fibres. Si dans d'autres expériences une augmentation de la résistance a été observée, on peut se demander quel paramètre (type de fibre ou longueur de fibre) a fait diminuer la résistance.



Fig. 8 Échantillon après rupture. Les fibres maintiennent ensemble toute la masse de l'échantillon (Simenson, 2011).

## FIBRES DANS LA MASSE

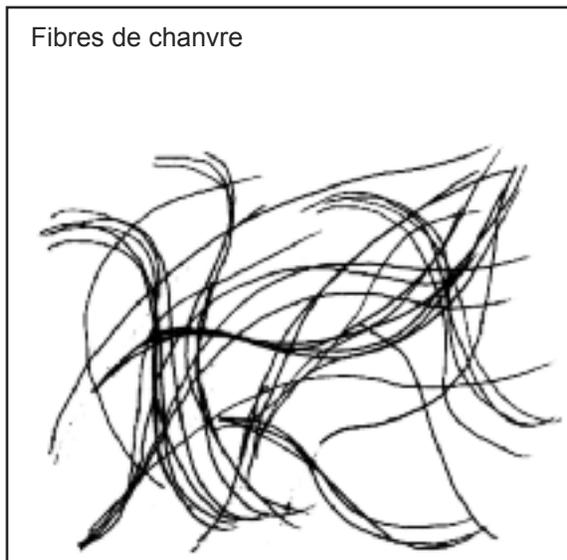


Fig. 9

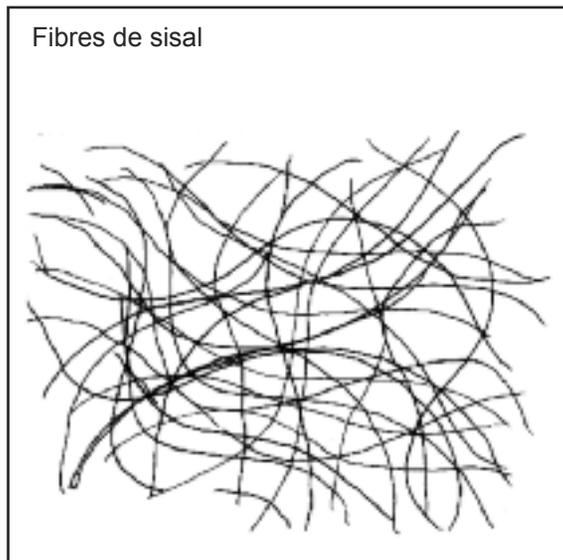


Fig. 10

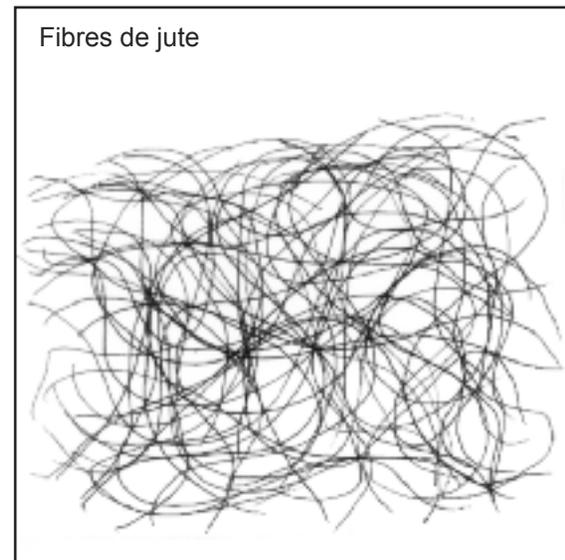


Fig. 11



Fig. 12

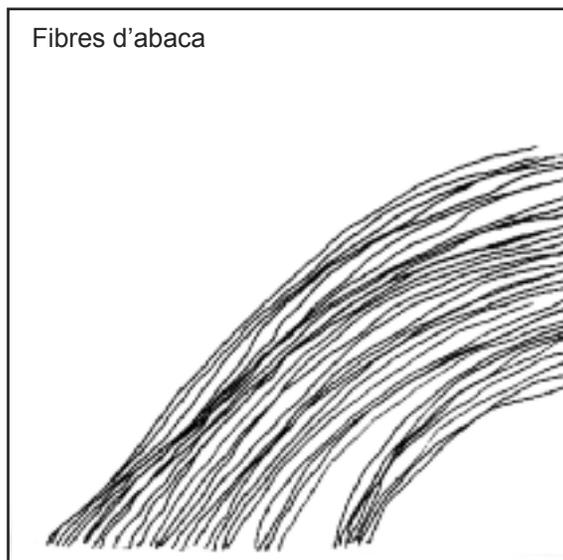


Fig. 13

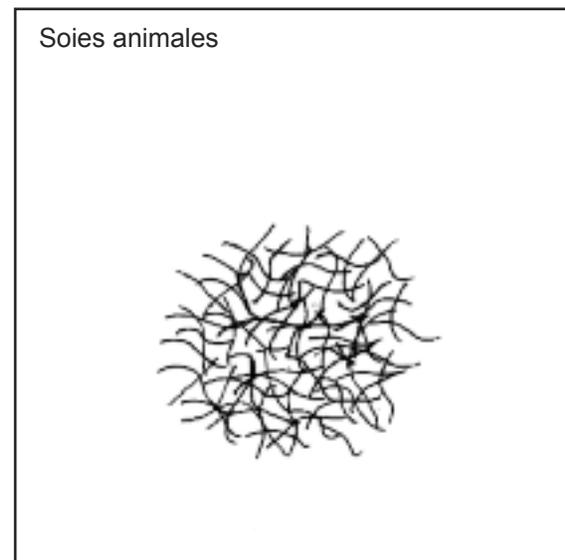


Fig. 14

## FIBRES DANS LA MASSE

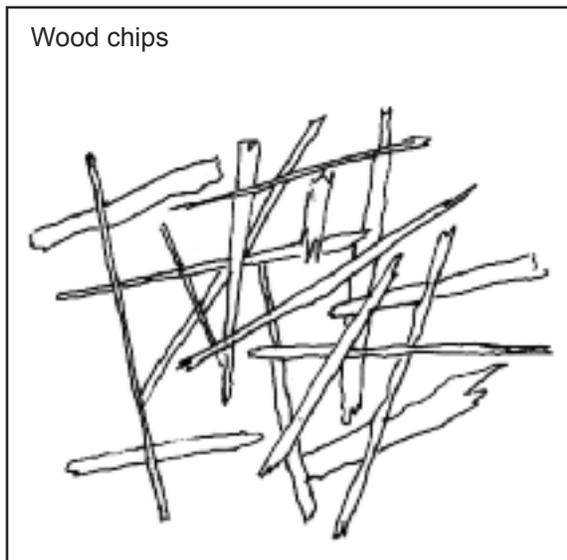


Fig. 15

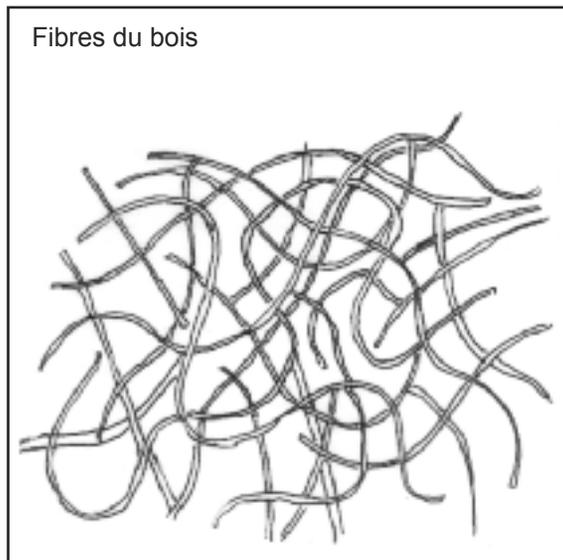


Fig. 16

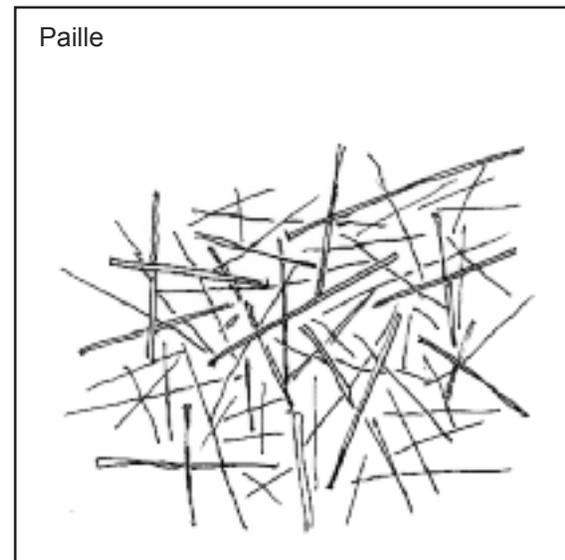


Fig. 17

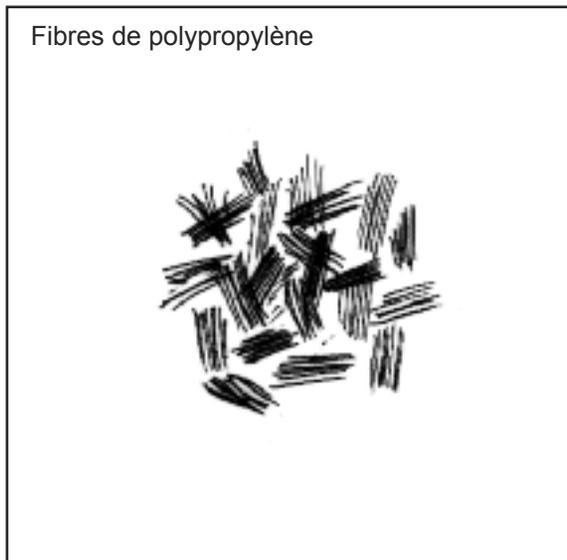


Fig. 18

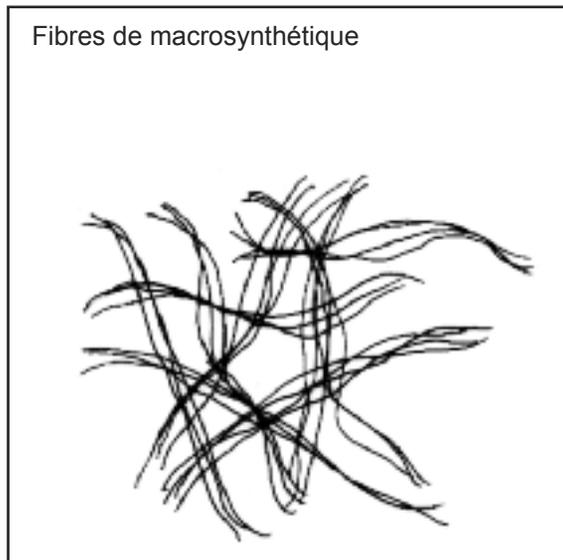


Fig. 19

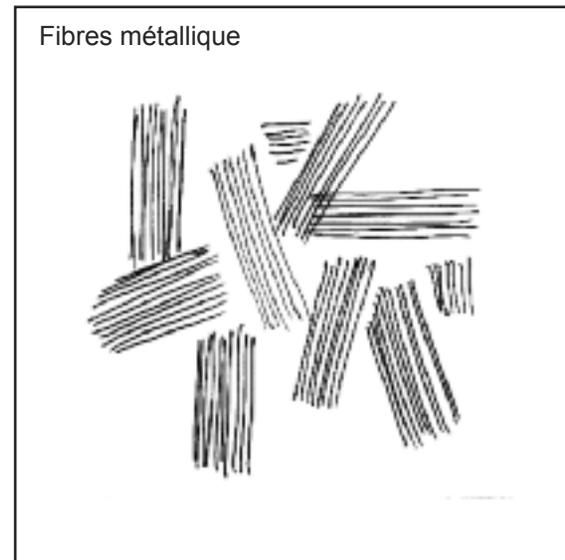


Fig. 20

# La terre coulée

Fig. 21



## 2.1 La terre coulée

Cette technique constructive est la même que celle utilisée pour le béton conventionnel. Elle permet de réaliser des éléments constructifs in-situ. Le coffrage est placé à l'emplacement final de l'élément à construire.

Dans ce chapitre, je mentionne brièvement deux exemples de réalisations en terre coulée découvert dans des sites archéologiques. Ensuite, je décris la mise en œuvre et la formulation de la terre coulée. Enfin je mentionne les constructeurs actuels de terre coulée à travers le monde. Ce chapitre est complété par les annexes 2 et 3. L'annexe 2, « C2D2 Béton d'argile Environnemental (B.A.E.) » montre les premiers chantiers en terre coulée qui ont été réalisés en France. Dans cette annexe, je présente deux chantiers auxquels j'ai participé en tant que stagiaire. Dans l'annexe 3, « Des projets en terre coulée », je montre quelques constructions précédemment réalisées en terre coulée. Pour les personnes qui ne sont pas familiarisées avec la terre coulée, la lecture de ces annexes permettront une lecture plus facile du chapitre 3.

Pendant des années, on a considéré que les constructions de la zone archéologique de Paquime, au Nord du Mexique, et des autres sites de la culture des « Pueblos », avait été construites en pisé.



Fig. 22 Murs en terre coulée du site archéologique de Sirupa, région de Chihuahua au Mexique (photo: Guerrero)(Guerrero, 2011).

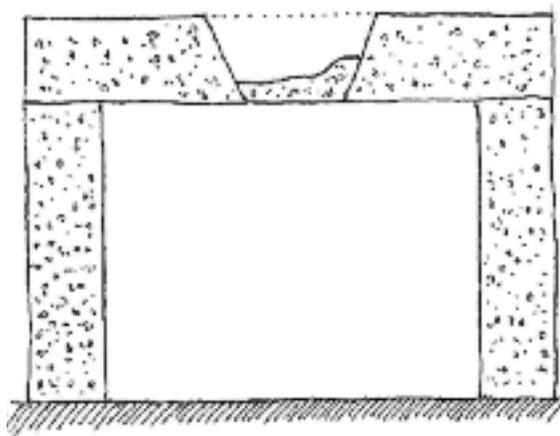


Fig. 23 Des constructeurs spécialisés construisaient, dans les temples de la culture « Chimúes », des planchers de terre coulée en trois pièces. Avec une distance libre sans support de 3 à 3,6 m.



Fig. 24 Mur de terre coulée construit par l'architecte Elena Ochoa selon la tradition constructive de Tesisitan au Mexique. (El Guardian,2014)

Les recherches de M. Cano indiquent que, selon l'irrégularité géométrique des bâtiments et les modèles de dégradation des structures, le système constructif utilisé aurait été une sorte de terre coulée : un mortier de terre, sables et graviers qui a été mis à l'état plastique dans un coffrage (Guerrero, 2011).

Le même type de mise en œuvre est rencontré dans la culture « Chimúes » au Pérou. De grands blocs étaient coulés in-situ, la grande masse de chaque bloc donnait aux constructions une stabilité face aux séismes. Avec cette même technique des constructeurs spécialisés construisaient, dans les temples des planchers en terre en trois pièces. La pièce centrale se réalisait en dernier pour la faire agir comme une clef d'arche. La distance libre entre les murs était de 3 à 3,6 m. (Campana, 2000)

Au Mexique, dans la région de Jalisco, dans le village de Tesistan, des murs de clôture se construisent traditionnellement en terre coulée. Des banchées de 90 centimètres de longueur pour 30 centimètres de hauteur sont utilisées. Cette technique est aussi appelé « adobón ». L'architecte Elena Ochoa a repris cette culture constructive pour construire les murs de clôture du Centre CIPTEV. Elle est aujourd'hui en train de construire une maison en terre coulée.

## 2.2 La mise en œuvre

Une des principales ressemblances de la terre coulée avec le béton est la mise en œuvre. La terre coulée se met en place comme le béton conventionnel. On peut vibrer, couler et pomper la terre coulée comme le béton. Les machines et les outils qui servent à fabriquer le béton, servent également à fabriquer la terre coulée. Les machines et les outils qui servent à mettre en place le béton, servent également pour la terre coulée. Les savoirs faire actuels du béton sont parfaitement transférables à la terre coulée.

De la même manière qu'avec le béton, la mise en œuvre de la terre coulée peut aller du simple au sophistiqué. Il est possible de fabriquer de la terre coulée à la main avec une pelle (fig.25), comme par exemple, l'école secondaire de Gando.

On peut préparer le mélange à la bétonnière et le transporter au coffrage, avec un seau (fig.291, 137p), une brouette, un godet verseur (fig.31, 29p), ou à l'aide d'un manitou (fig.282, 134p), etc. Au Mexique 65% de l'habitat se fait en soit auto-construction, soit par l'embauche d'un artisan par les familles. Un nombre important de maisons sont des constructions de un à deux étages. Les planchers sont généralement en béton armé. Il existe des équipes spécialisées pour transporter avec des seaux, le béton de la bétonnière

jusqu'aux planchers. Quand tout est préparé, l'équipe arrive au chantier, et le plancher est coulé en une journée. Le nombre des personnes dans l'équipe augmente selon la surface à couler. Voir des équipes de vingt personnes est quelque chose de courant. Cette intensité de main d'œuvre est impensable dans certains pays, mais est une réalité dans d'autres.

Il est possible de mélanger la terre coulée avec différentes sortes de malaxeurs, et utiliser une grue pour couler, comme ça a été le cas sur le chantier de Caracol à Paladru, page 129.

Avec une formule adéquate la terre coulée peut se fabriquer en centrale et être transportée en camion toupie, comme ça été le cas pour le chantier de la Maison de Marais, page 131. Elle peut être pompée comme c'est la pratique courante de l'architecte Frerking sur ses chantiers en Arizona.

La terre coulée permet une simplicité ou sophistication de la mise en œuvre, autant qu'une intensité de la main d'œuvre ou une utilisation intensive des machines. Les images suivantes sont témoins de la ressemblance de la mise en œuvre entre la terre coulée et le béton.



Fig. 25 Préparation à la main du mortier pour être transporté et coulé à la main également. (Holcim Foundation, 2014)



Fig. 26 Préparation de terre coulée pour échantillons soumis à charges cycliques. Voir pages 91-98.



Fig. 27 Malaxeur utilisé au chantier de Paladru, de l'entreprise Caracol.



Fig. 28 Ajout de paille dans le mortier au chantier de Paladru, de l'entreprise Caracol.



Fig. 29 Malaxage et criblage dans le chantier de à Saint Didier de l'entreprise Caracol. (Moevus, B.A.E., 2013)



Fig. 30 Malaxeur planétaire de l'entreprise CE-MATERRE. (Le Moniteur Tv)



Fig. 31 Godet verseur utilisé au chantier de Paladru, de l'entreprise Caracol.



Fig. 32 Coulage de mur dans le chantier de Sasse-nage, de l'entreprise Caracol. (photo: Joris)



Fig. 33 Coulage de mur avec malaxeur planétaire dans le chantier de à Saint Didier de l'entreprise Caracol. (Moevus, B.A.E., 2013)



Fig. 34 Vibration de mélange pendant le chantier de Paladru, de l'entreprise Caracol.



Fig. 35 Camion toupie en train de verser de la terre coulée, dans le chantier de la Maison du Marais, de l'entreprise Caracol.



Fig. 36 Prémix de terre coulée dans le central des carrières de Boulonnais, pour le chantier de la Maison du Marais. (Moevus, B.A.E., 2013)



Fig. 37 Décoffrage de mur dans le chantier de Sasse-nage, de l'entreprise Caracol. (photo: Joris)



Fig. 38 Pompage de terre coulée dans un chantier de l'architecte Michael Frerking. (Green Home Building)



Fig. 39 Camion malaxeur de l'entreprise Maxeh Ter-racreto au Mexique. (Maxeh, 2014)



Fig. 40 Utilisation de la règle. (Argilus, 2014)



Fig. 41 Utilisation de la taloche. (Argilus, 2014)



Fig. 42 Utilisation de règle vibrante dans une dalle de terre coulée. (photo: Caracol)

## 2.3 Formulation de la terre coulée

Je montre, page suivante, un diagramme de formulation de terre coulée.

Il énumère schématiquement quelles pourraient être les étapes à suivre pour un travail de formulation d'une terre coulée. Il est loin d'être un protocole de formulation et plusieurs modifications pourraient être faites à ce diagramme. Je l'ai mis en place à partir des expériences de formulation de terre coulée à l'Auroville Earth Institute en Inde, et des travaux de formulation de l'entreprise Caracol Écoconstruction pendant le projet « Béton d'argile environnemental, B.A.E. » (Cf. annexe 2). Il reste encore à explorer si les méthodes de formulation du béton conventionnel pourraient apporter quelque chose à la formulation de la terre coulée.

Dans la terre coulée on peut avoir une très grande variété de type de mélanges. La fig. 43 en montre une gamme étendue, de la plus simple qui serait de la terre et de l'eau, à la plus complexe, comme une terre amendée d'un ou deux types de sables, d'un ou deux types de graviers, d'un stabilisant physico-chimique, d'un dispersant et de fibres dans la masse. Chaque formule obtenue a ses caractéristiques propres, selon la terre et les ajouts utilisés, et la proportion de chaque constituant.

Tout le diagramme se développe à partir d'une terre, soit sélectionnée, soit de la terre disponible localement et utilisable en construction. (fig.44).

### Variété des formules pour la terre coulée

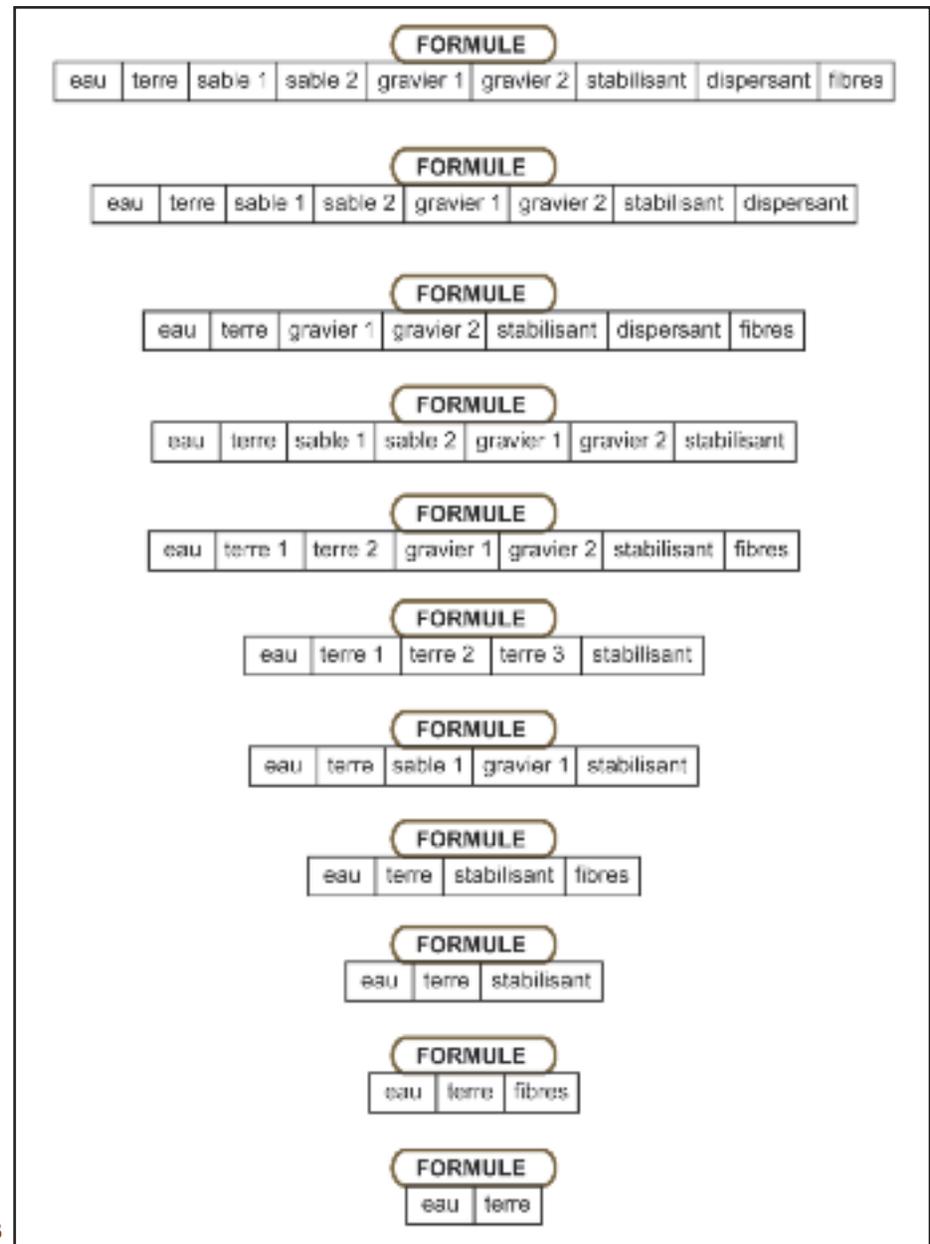


Fig. 43

## Diagramme de formulation de terre coulée

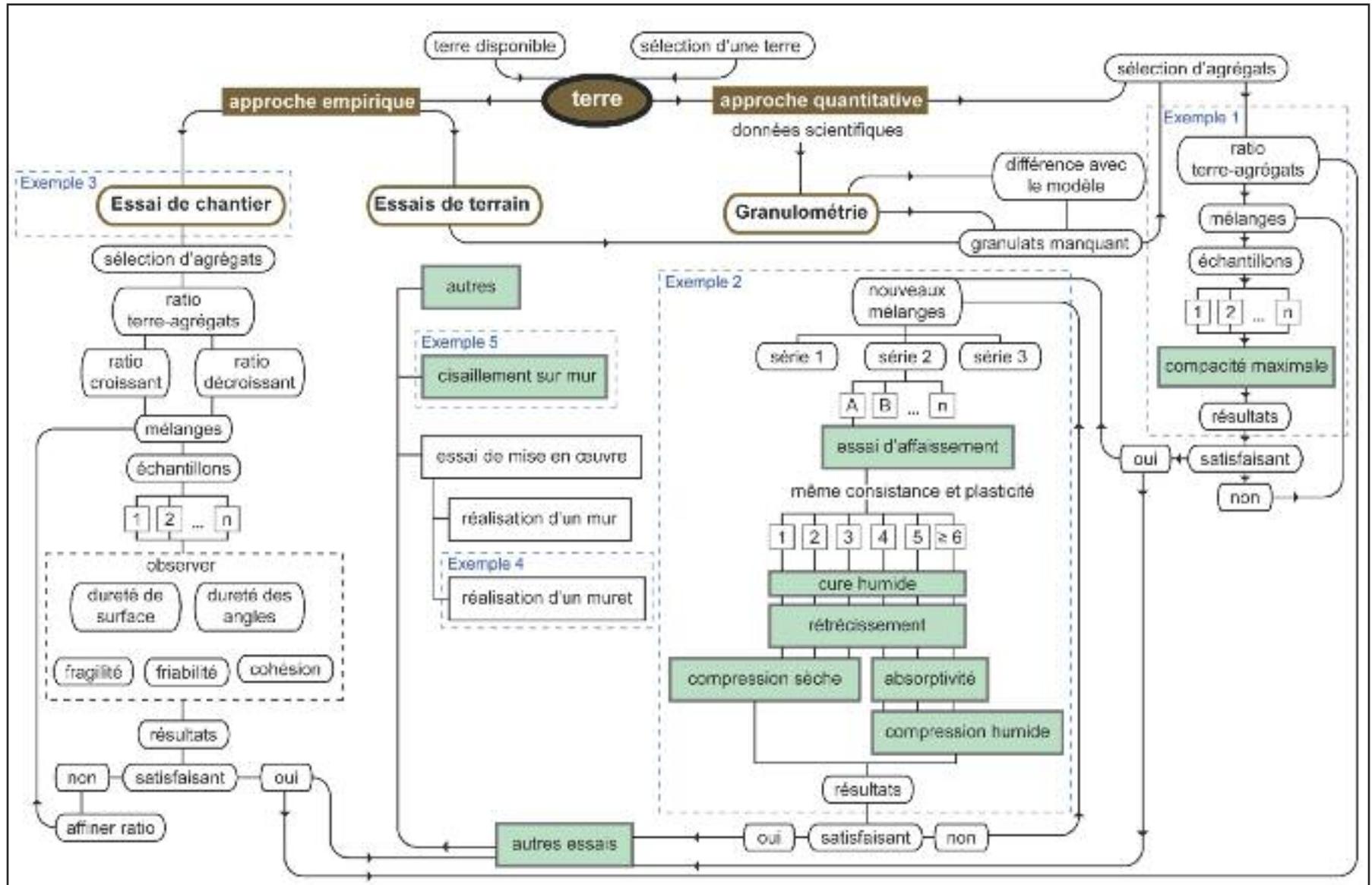


Fig. 44 Ce diagramme montre les étapes et les possibilités à suivre pour la formulation de la terre coulée. Les rectangles pointillés en bleu indiquent quelles parties du diagramme sont illustrées avec des exemples. Les exemples 1 et 2 sont présentés dans cette section (2.3). Les exemples 3, 4 et 5 sont présentés dans la section 4.4, page 91.

On peut aborder la formulation par une approche quantitative, basée sur des données scientifiques, ou par une approche subjective basée sur l'expérience.

Si le cahier des charges est précis et exigeant, le procédé devra être plus rigoureux, basé sur l'utilisation de données scientifiques. Cette méthodologie peut être longue, et nécessite des équipements et machines spécifiques dont les protocoles d'essais doivent être suivis. Ce procédé est conseillé dans le cadre de recherches, pour un chantier particulier, pour développer une formulation destinée à être utilisée dans une certaine région, pour développer une gamme de terres coulées dans une région, etc.

Avec « l'approche empirique », on peut procéder par « essais de chantier ». (exemple 3, page 91) Les étapes sont les suivantes :

- on fait la sélection d'agrégats ;
- on détermine un dosage croissant et décroissant ;
- on fait un échantillon pour chaque mélange à tester ;
- on laisse sécher les échantillons ;
- on observe la fragilité, friabilité, cohésion, dureté de surface et dureté des échantillons ;
- on juge si les résultats sont satisfaisants pour les besoins requis ;
- si c'est le cas, on peut faire un essai de mise en œuvre ou construire un muret expérimental avec la formule retenue, avant de l'utiliser dans l'ouvrage définitif ;

- si ce n'est pas le cas, on affine le dosage et on refait des échantillons, puis on analyse les nouveaux résultats ;
- on refait des dosages et des échantillons autant de fois que nécessaire.

Dans « l'approche objective » on peut choisir les agrégats et le dosage pour démarrer les essais selon deux approches, soit :

- directement en assignant un dosage croissant et décroissant des agrégats ;
- à partir des résultats d'un « essai de chantier » ;
- On fait la granulométrie de la terre en question pour déterminer les granulats manquants à partir, soit :
  - du modèle d'Andreasen ;
  - d'une méthode de formulation pour béton ;

Une fois que le dosage est déterminé, on détermine quel mélange a une compacité maximale. Elle s'obtient en divisant la densité apparente par la densité spécifique d'un mélange. On prend les mesures directement sur les mélanges sans avoir besoin de faire des échantillons (Cf. exemple 1 page 34). Les mélanges les plus denses servent à faire de nouveaux dosages ou à être testés directement dans d'autres essais.

Pour les essais de résistance à la compression, absorption et retrait, on peut avoir une ou plusieurs séries de mélanges

qu'on voudrait tester. Chaque série peut avoir plusieurs mélanges. Dans le diagramme les mélanges sont représentés par les lettres A, B, C, D. On peut faire un essai d'affaissement pour chaque mélange pour mesurer la quantité d'eau et garantir une même consistance et plasticité. Et pour chaque mélange à tester on doit effectuer au moins 6 échantillons.

On peut mesurer le retrait de chaque échantillon (activité non destructive). Pour chaque mélange trois échantillons sont utilisés pour l'essai d'absorption puis dans la foulée pour l'essai de compression humide. Les trois autres échantillons sont utilisés pour l'essai de compression sèche. Les résultats indiquent si les dosages doivent encore être affinés par de nouveaux mélanges, ou bien si les formules sont correctes pour être utilisées dans d'autres essais, comme c'est indiqué dans le diagramme.

Avant d'utiliser définitivement une formule, il peut être nécessaire de faire un essai de mise en œuvre, ou bien réaliser un muret expérimental ou un mur témoin.

## 2.3.1 Exemple 1

Dans l'Auroville Earth Institute Jérôme Choquet a mené des travaux de compacité des mélanges de deux types de gravier, sable et de la terre rouge d'Auroville, les proportions utilisées sont montrées dans la fig. 45. Le mélange plus compact a été celui de 25% de chaque composant. Les résultats ont permis de constater qu'un mélange équilibré entre les tailles d'agrégats donne une compacité optimale.

Avec les mélanges plus compacts, il a fait des séries d'éprouvettes avec 5,7,5 et 10% de ciment en pourcentage massique total; qui a testé à la compression, avec des résultats d'entre 3 et 5MPa. Finalement il a fait, avec une équipe de l'institut, trois murs

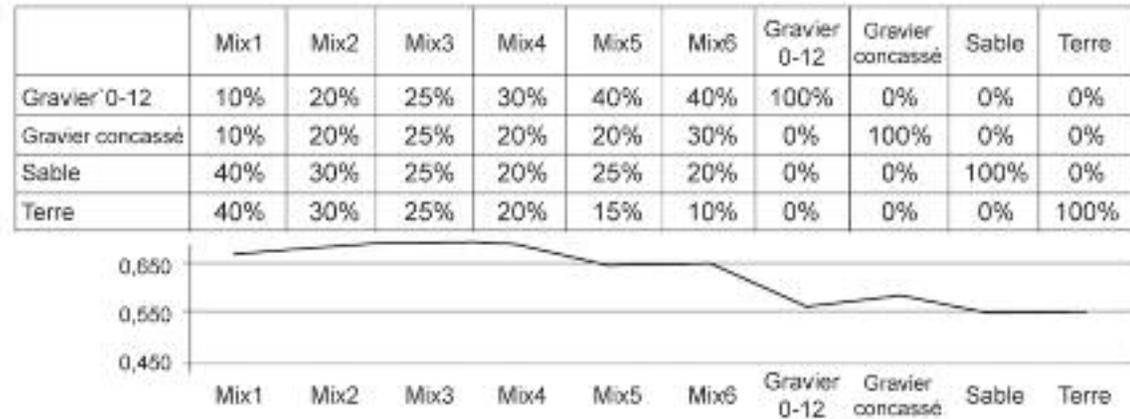


Fig. 45 Résultats de compacité de mélanges (Cochet, 2011).

en terre coulée de formulations différentes, avec 7,5% de ciment et un moyen de 10,3% de teneur en eau initiale. Deux ans après, ils sont maintenant en très bon état

et ont bien résisté à l'humidité et ne présentent aucune fissures, voir fig. 46 (Cochet, 2011).



Fig. 46 Murs en terre coulée de 24x120x225 centimètres. Les formules de trois murs en pourcentage de composant, terre : sable : gravier concassé : gravier 1/2", gravier 1", sont les suivantes. Mur 1, 25%:25%:15%:15%:20%. Mur 2, 20%:20%:20%:20%:20%. Mur 3, 15%:25%:15%:25%:20% (Cochet, 2011).

## 2.3.2 Exemple 2

Aussi dans l'Auroville Earth Institute Clémentine Browne a fait des essais de compression sèche et humide, d'absorptivité, et de retrait. L'objectif était de trouver un matériau avec un minimum de 6MPa en compression sèche et 3 MPa en compression humide; avec une absorptivité en-dessous de 10%; et avec un rétrécissement en-dessous de 0,1%.

Elle a testé deux terres différentes, la terre rouge d'Auroville et une terre argileuse de Mangalam. Pour chaque terre elle a fait trois séries : groupe de contrôle, le groupe chaux-ciment, et le groupe maximisant la portion de terre. Les trois formules du groupe de contrôle ont été utilisées pour les trois murs construits en 2011. Toutes les formules utilisées sont présentées dans le cadre à gauche. La nomenclature R correspond à la terre rouge et la M à la terre de Mangalam. Le pourcentage de ciment est calculé par rapport à la masse totale d'agrégat y compris le ciment. La chaux est également rapport à la masse totale, sans tenir compte du ciment. Les pourcentages d'agrégats sont en fonction du volume. Pour mesurer la consistance et la plasticité des mélanges, elle a suivi le protocole standard européen NFP 18-451. Et pour les tests en compression le standard américain ASTM C39 et le ASTM C31. Les mesures de rétrécissement ont été prises en deux points de chaque éprouvette au terme de 1,2 et 4 semaines pour les échantillons avec ciment, et de 1,2,4,8 et

### groupe de contrôle

série	% ciment	% terre	% sable	% gravier 1/4"	% gravier 1/2"	% gravier 1"
1CyR1	7,5	25	25	15	15	20
1CyR2	7,5	20	20	10	20	20
1CyR3	7,5	15	25	15	20	20

### groupe ciment-chaux

série	% ciment	% chaux	% terre	% sable	% gravier 1/4"	% gravier 1/2"	% gravier 1"
2CyR1	7	1	25	25	15	15	20
2CyR2	6	2	25	25	15	15	20
2CyR3	5	3	25	25	15	15	20
2CyR4	4	4	25	25	15	15	20
2CyR5	3	5	25	25	15	15	20
2CyR6	3	6	25	25	15	15	20

### maximisant la portion de terre

série	% ciment	% terre	% sable	% gravier 1/4"	% gravier 1/2"	% gravier 1"
3CyR1	7,5	30	23.33	14	14	18.67
3CyR2	7,5	35	21.67	13	13	17.33
3CyR3	7,5	40	20.00	12	12	16.00
3CyR4	7,5	45	18.33	11	11	14.67
3CyR5	7,5	50	16.67	10	10	13.33

12 semaines pour ceux avec chaux-ciment.

Les résultats sont montrés dans les fig. 47, 48 et 49. On note une diminution de Rc avec l'augmentation de la quantité de sol dans les séries 1Cy et 3Cy. Les échantillons réalisés avec la terre de Mangalam présentent une Rc plus faible que ceux réalisés avec la terre rouge d'Auroville. Dans les échantillons ciment-chaux on observe une diminution de Rc avec la diminution du ciment. La pente de diminution est moins forte pour les échantillons de la terre de Mangalam.

Les échantillons réalisés avec la terre d'Auroville atteignent plusieurs des objectifs initiaux, à l'exception du rétrécissement. L'échantillon 3CyR4 avec 43% de terre, remplit presque tous les objectifs, sauf la Rc sèche.

Browne termine cette partie en exprimant que «Les différents éléments de la construction ont des exigences spécifiques. Ce large éventail de performances autorise donc à choisir une composition du béton en fonction des nécessités pour la construction, et l'on pourra maximiser la proportion de sol ajoutée au mélange tout en gardant des caractéristiques convenables pour l'élément»(Browne, 2014)

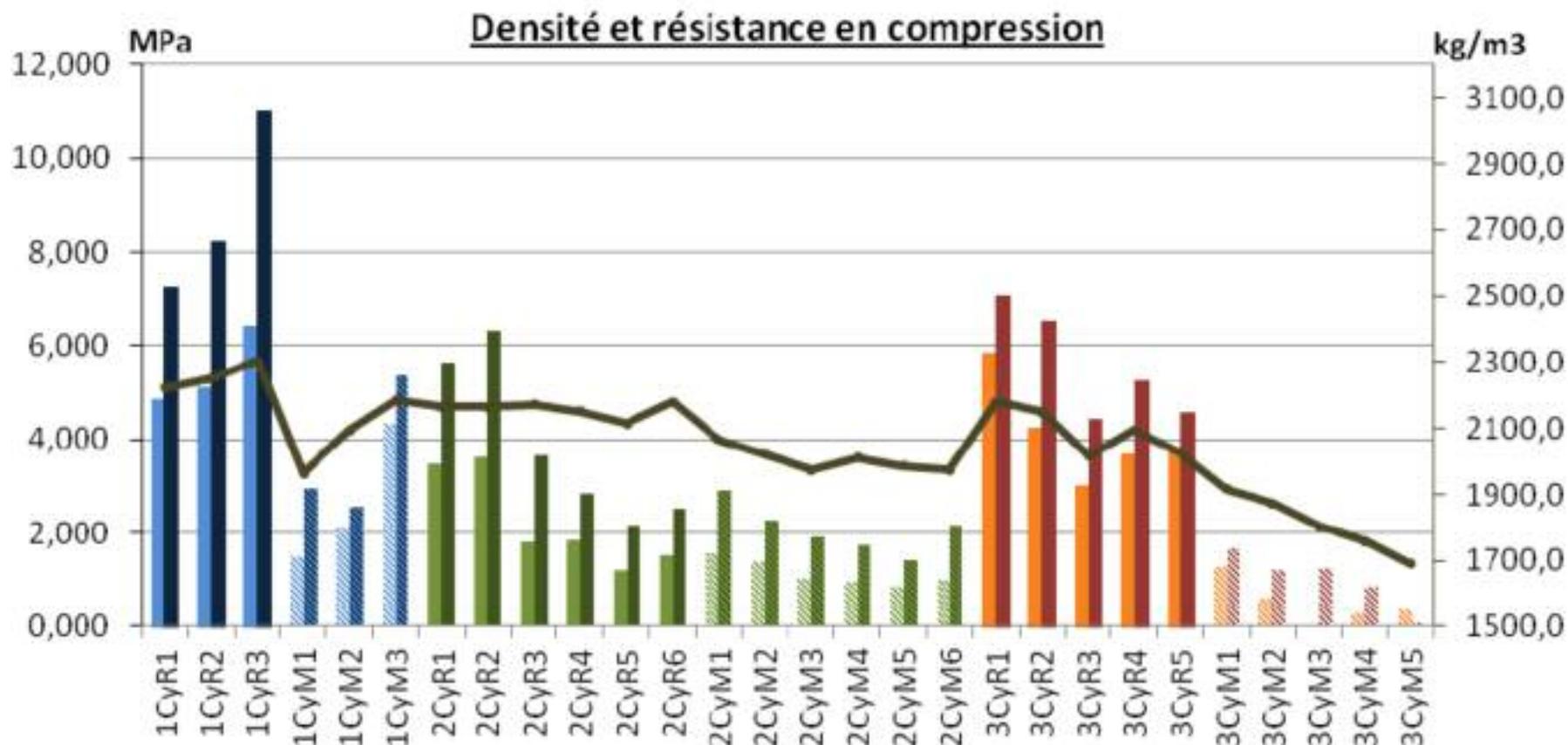


Fig. 47 Ce graphique présente les résultants de la résistance à la compression, en parallèle avec la courbe d'évolution de la densité. Pour chaque série on peut apprécier deux bars, le bar de gauche représente la Rc humide et celle de droit la Rc sèche. (Browne, 2014)

«Il est très intéressant de constater grâce à ce graphe que la densité semble conditionner de façon très importante la résistance en compression pour les séries 1Cy et 3Cy. Cela est moins flagrant pour la série 2Cy. Les valeurs obtenues sont bien plus élevées, tant pour la densité que pour la résistance en compression, que celles précédemment obtenues dans la

recherche. Cela est probablement dû à l'ajout de graviers larges d'un pouce, qui sont l'élément le plus dense du mélange. On remarque en superposant les courbes de distribution de taille des grains avec celles du béton classique que l'ajout de ces agrégats rapproche de la distribution d'un béton classique. Cela pourra donner une piste pour améliorer encore la qualité du mélange de

base. Par contre, il y a un autre facteur conditionnant la résistance en compression pour la série 2Cy. La densité est relativement constante pour des échantillons d'un même type de sol, ce qui est normal car le mélange de base ne varie pas. C'est donc bien le type de stabilisant qui intervient ensuite pour créer un matériau résistant»(Browne, 2013, 12p.)

	Résistance en compression (MPa)		Absorptivité (%)	Rétrécissement (%)
	Humide	Sèche		Valeur totale
1CyR1	4.849	7.266	7.2	0.24
1CyR2	5.106	8.227	6.9	0.31
1CyR3	6.438	11.033	6.1	0.14
1CyM1	1.472	2.929	13.1	0.25
1CyM2	2.090	2.543	9.7	0.15
1CyM3	4.330	5.356	7.6	0.08
2CyR1	3.479	5.633	7.9	0.41
2CyR2	3.634	6.315	7.8	0.16
2CyR3	1.811	3.667	7.9	0.61
2CyR4	1.843	2.830	8.0	0.21
2CyR5	1.189	2.180	8.2	0.23
2CyR6	1.530	2.515	7.9	0.14
2CyM1	1.574	2.909	10.9	0.27
2CyM2	1.369	2.277	10.6	0.25
2CyM3	1.019	1.920	12.4	0.38
2CyM4	0.948	1.728	11.7	0.57
2CyM5	0.866	1.422	12.1	0.42
2CyM6	0.979	2.174	12.0	0.35
3CyR1	5.843	7.048	7.3	0.16
3CyR2	4.255	6.528	7.3	0.11
3CyR3	2.998	4.439	10.6	0.14
3CyR4	3.681	5.247	8.8	0.05
3CyR5	3.778	4.593	10.3	0.13
3CyM1	1.259	1.656	11.9	0.11
3CyM2	0.600	1.213	12.2	0.21
3CyM3	0.050	1.224	16.0	0.24
3CyM4	0.282	0.832	15.0	0.27
3CyM5	0.363	0.050	15.1	0.34

Fig. 48 Ce tableau montre les résultats totaux des tests. Le fond jaune indique que les objectifs ont été couverts ( 3MPa en Rc humide, 6MPa en Rc sèche, moins de 10% d'absorptivité et moins de 0,1% de rétrécissement) (Browne, 2014)

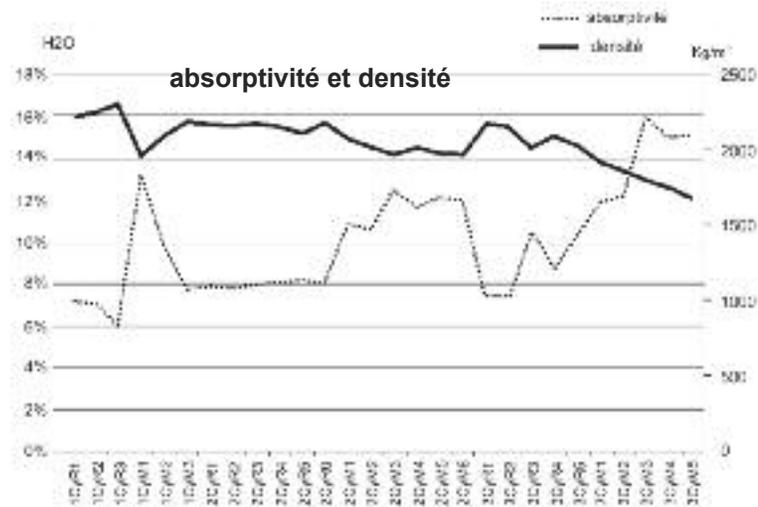


Fig. 49 Ce graphe montre l'absorptivité et la densité des échantillons. (Browne, 2014)



Fig. 50 Presse de l'Auroville Earth Institute pour les essais de compression. (Browne, 2014)

### 2.3.3 Leçons dans la formulation

Il n'existe pas une méthode pour la formulation de terre coulée, toutefois les recherches et les expériences réalisées au cours des dernières années nous laissent quelques connaissances que je liste par la suite:

- La compacité maximale d'un mélange de granulats est attendue en s'approchant le plus du modèle d'Andreasen.
- Les méthodes de formulation du béton cherchent la compacité maximale des mélanges de granulats. On a observé que la granularité de mélanges de terre coulée qui s'approche plus de celles du béton, présentent plus de résistance mécanique.
- On peut changer la teneur en eau initiale en changeant la granularité d'une mélange.
- La granularité est un facteur qui change la rhéologie d'un mélange. Un mélange terre à piser tamisée à 0-10 avec du sable à béton 0-12 est plus fluide à la même teneur en eau que s'il y aurait du sable à béton 0-20.
- «A l'état frais, les paramètres matériau qui influencent le plus les propriétés rhéologiques de la terre sont la teneur en argiles, la surface spécifique des argiles et leur capacité d'échange cationique, la courbe granulométrique. De ces

paramètres "élémentaires" découlent d'autres propriétés comme la plasticité, la consistance et le comportement rhéologique». (Rapport Scientifique, Moevus, B.A.E., 2013)

- Il a été trouvé que les mélanges plus denses sont aussi les plus résistants à la compression.
- La taille de granulat, la présence ou absence de gravier 1" par exemple, peut avoir une influence sur la réduction de la résistance à la compression jusqu'au 50% (Browne, 2014)
- La granularité d'une formule qui va être transportée en camion toupie, doit minimiser le phénomène de ségrégation. La fraction granulaire de plus grande taille ne doit pas être majoritaire afin de limiter le phénomène de ségrégation (Couvreur, 2012).
- L'optimisation granulaire permet de réduire la teneur en ciment d'un mélange. Un matériau plus dense a besoin de moins de ciment pour atteindre une même résistance à la compression, par rapport à une autre formule moins dense.
- La réduction de la teneur en eau initiale permet d'avoir un matériau moins poreux et donc plus dense.
- La teneur en eau initiale a une relation directe avec les résistances mécaniques,

divers tests ont permis de voir que plus la teneur en eau est bas, plus la résistance à la compression est grande.

- L'utilisation d'un dispersant permet de réduire la teneur en eau initiale est d'augmenter la résistance à la compression jusqu'à un facteur 1,5-2.
- Vibrer un mélange, pendant sa mise en œuvre, permet de réduire la teneur en eau initiale.
- «À l'état durci, les propriétés hygrométriques, mécaniques et thermiques dépendent toutes des mêmes paramètres principaux : la porosité totale, la distribution de taille des pores, la teneur en argiles, la surface spécifique des argiles et leur capacité d'échange cationique, l'empilement granulaire. 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. De cette succion dépendent en partie les propriétés mécaniques macroscopiques. La présence d'eau influence également les propriétés thermiques de la terre.» (Rapport Scientifique, 66p., Moevus, B.A.E., 2013)

## 2.3.4 La terre coulée dans le monde

On constate un intérêt croissant pour la terre coulée dans différentes régions du monde.

Dans l'annexe 2 on peut apprécier quelques travaux de l'entreprise Caracol Éco-construction. Les trois ans du projet «Béton d'argile environnementale (B.A.E.)», avec les huit partenaires ayant participé, font preuve d'un grand intérêt. Deux entreprises Françaises, Cematerre et Argilus commercialise de la terre coulée. L'architecte Français Baudoin, construit depuis plusieurs années avec ce qu'il appelle le «béton du site».

En Australie l'entreprise Formbloc commercialise des moules pour faire des murs en terre coulée.

L'Université de Mokpo en Corée a beaucoup d'avance dans ses recherches en terre coulée.

L'architecte Francis Kéré a construit une école en terre coulée qui a été lauréat du Global Holcim Awards Gold project en 2012.

L'Auroville Earth Institute en Inde fait des recherches depuis trois ans pour mettre au point des formules de terre coulée. Il a coulé trois murs et des poutres en terre coulée, renforcées en bambou et en acier, avec succès.

L'architecte Michael Frerking a construit depuis, 14 maisons parasismiques en terre coulée en Arizona, aux États Unis. Précédemment Belshaw, Nelson et Hopman avaient construit des maisons en terre coulée.

Au Mexique, l'architecte Elena Ochoa est en train de construire une maison en terre coulée. Le docteur Luis Fernando Guerrero

Baca anime la formulation de terre coulée et la construction expérimentale des murs en terre coulée. En 2012 la docteur Yolanda Aranda a fait un projet de formulation de terre coulée en collaboration avec A. González Defelice d'Argentine. Avec une équipe de l'Université de Tamaulipas, elle a également conçu et construit un prototype de maison en terre coulée.

Également au Mexique, l'entreprise Maxeh Terracreto commercialise autant de la terre coulée qu'un additif pour la terre coulée, probablement un dispersant.

Dans l'annexe 3 je montre quelques projets en terre coulée.

**La terre coulée armée**

DSA-Architecture de terre 2012-14: Abriseth HERNANDEZ



Fig. 51 Photo : Micheal Frerking

# La terre armée

Le bois a été traditionnellement utilisé pour renforcer les murs en pisé dans la région du Dauphiné, en France. Dans les travaux de rénovation, dans les construction en pisé, il est commun de trouver des planches, tasseaux ou pièces de bois brut à l'intérieur des murs. On les trouve dans la partie central, dans le coins ou l'intersection des murs (fig. 52 et 54). Il a été découvert que dans les régions sismiques les murs renforcé avec du bois, résistaient mieux au forces de flexion. (Olarte, Guzman, 1993, p.99). Depuis de millénaires on a utilisé toutes sortes de tiges, cannes et bambous pour la construction de murs en torchis. On trouve également l'incorporation des nattes de roseaux dans la muraille de Chine dans la partie qui traverse le désert de Gobi (fig. 53) et dans le murs en adobe du Ziggurat de Dur-Kurigalzu (fig. 55) (Anger, 2011, 55p). Ils sont nombreuse les exemples en terre armée que le patrimoine construit nous offre. Son étude peut nous permettre d'élargir notre compréhension de l'interaction entre les armatures et la terre. Malheureusement, je n'ai pas eu le temps de suivre cette voie de recherche.

Je présente dans ce chapitre, une étude non exhaustive, de l'état de l'art en matière de terre armée.

Suite à la révision de nombreuses sources, je montre une synthèse graphique des armatures et un bref résumé des quelques projets et recherches.



Fig. 52 Planche en bois trouvé pendant le percement d'une ouverture dans un mur en pisé en Chimilin en Isère; pendant mon stage chez Caracol.



Fig. 54 Inclusions bois dans l'intersection de deux murs en pisé, dans une vieille grange près de Paladru, en Isère, pendant mon stage chez Caracol.



Fig. 53 Muraille de Chine, dans la section désert de Gobi, construit avec des lits de roseaux, sable et graviers (Anger, 2011, 55p)



Fig. 55 Mur en adobe avec des lits de roseaux tous les cinq rangées, Ziggurat de Dur-Kurigalzu (photo: Silvia Reyes) (Anger, 2011, 55p)

Comme je l'ai déjà exposé, la terre comme matériau de construction résiste mieux aux efforts de compression, que aux efforts de traction, flexion, torsion ou cisaillement. On peut donc, associer la terre avec autres matériaux pour changer sa résistance. On la renforce, on fait de la terre armée. Ce le type de matériau associe avec la terre, et la disposition du matériau de renforcement, ou de l'armature, à l'intérieur d'un élément constructif, qui va rendre, avec les caractéristiques de la terre utilisée, plus résistant à un ou plusieurs types d'efforts. Le renforcement se fait plutôt avec des matériaux qui ont une bonne résistance à la traction. Et on joue avec la section, l'emplacement et le nombre d'éléments de renforcement pour faire face aux efforts. C'est aussi l'interaction conjointe des éléments constructifs dans une conception architecturale cohérente qui rendent une construction résistante aux différents efforts.

De la même façon que l'incorporation des fibres dans la masse change le comportement mécanique de la terre, l'inclusion des pièces d'un matériau qui résiste bien à la traction, à l'intérieur d'un élément constructif, change ses caractéristiques et le rend plus résistant aux forces sismiques.

Dans la diversité des sources comme des ouvrages, les codes de construction de différents pays, articles de revues, articles dans des actes des colloque, thèses, enregistrements vidéo et pages web, j'ai cherché quels sont les types des

renforcements et armatures utilisés dans la construction parasismique en terre crue et quels sont les projets de recherche et ses résultats concernant la terre armée. On arme les éléments constructifs de plusieurs techniques constructives en terre crue, comme le pisé, l'adobe, le BTC, le torchis, la bauge, la terre allégée, et même la terre coulée. Les matériaux de renforcement trouvés sont nombreux: du bois; des tiges, cannes et bambous de différentes espèces; et dans des projets plus récent de l'acier, du plastique, des grilles en acier, des géogrilles de différents matériaux plastiques et des toiles treillis en fibre de verre. On peut les classer en renforcement: vertical, horizontal, armatures et renforcement avec des grilles.

Les résumés des projets dans les pages 43-46, ont pour objectif présenté un type de renforcement spécifique qui a été l'objet d'un projet de recherche où est utilisé actuellement dans la construction. Ils montrent prioritairement le type d'élément constructif renforcé, le type d'armature ou renforcement utilisé, le matériau de renforcement, la disposition spatiale des renforcement ou armatures dans les éléments constructifs, les fonctions des renforcement et leur relation avec d'autres éléments constructifs. Ils montrent le type de technique constructive utilisée; s'il s'agit d'un élément constructif porteur ou non porteur. Quand il s'agit d'un projet de recherche, ils montrent quel sont les résultats obtenus, qui a fait la

recherche ou qui a été la personne responsable, et la date du projet. Dans les sources étudiées il y a beaucoup plus d'informations qui ne sont pas présentées dans cette ouvrage.

Par la suite, je montre une série de dessins sous forme de synthèse graphique des différents types des renforcement. Chaque résumé de projet est aussi exprimé en dessin. Chaque dessin est un résumé graphique des différents renforcements et armatures observés. Il y a beaucoup plus de dessins que des résumés de projets. Les dessins reprennent la disposition spéciale des renforts du projet d'origine, néanmoins l'espacement des renforcements ou de l'armature, et les dimensions des éléments constructifs des projets originaux ne sont pas respectés. Dans un certain sens, chaque dessin est une représentation typologique d'une armature ou un renforcement spécifique observé. Il faut mentionner également que chaque dessin montre une typologie dans le but d'être imaginé à l'intérieur d'un mur en terre coulée. Le processus a été de regarder dans l'existant, quels armatures étaient susceptibles d'être utilisée dans la terre coulée. Il s'agit à ce moment de la réflexion d'une transposition brute ou primitive de ce qui pourrait être utilisé pour armée la terre coulée. Je vous invite à regarder les dessins et lire les résumés qui nous donneront par la suite les éléments pour élargir les possibilités d'armatures et composer les pistes pour la formulation des systèmes constructifs parasismiques en terre coulée armée.

## Typologies de renforcement existantes

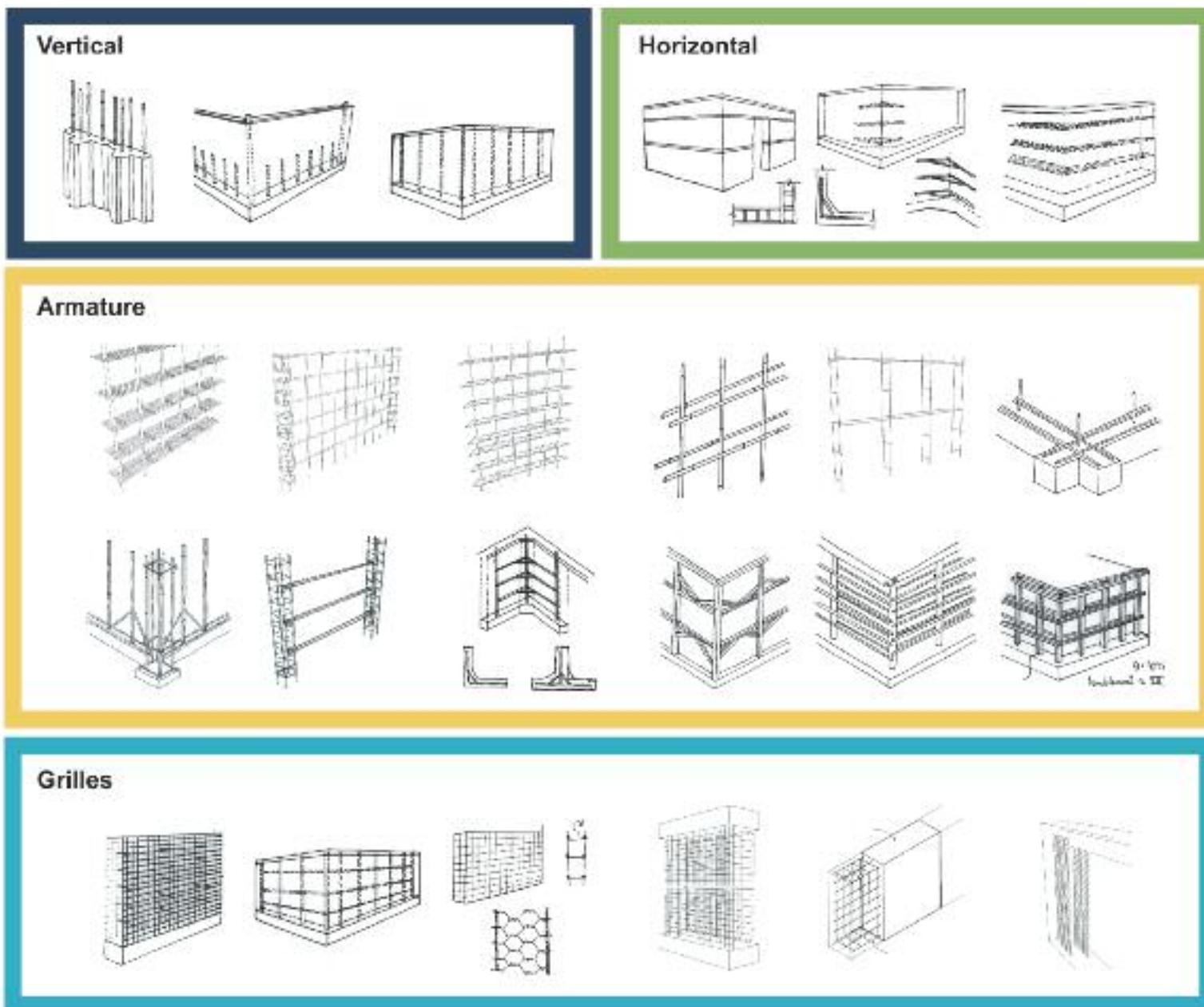


Fig. 56 Typologies de renforcement existantes.

## RENFORCEMENT VERTICAL ET HORIZONTAL

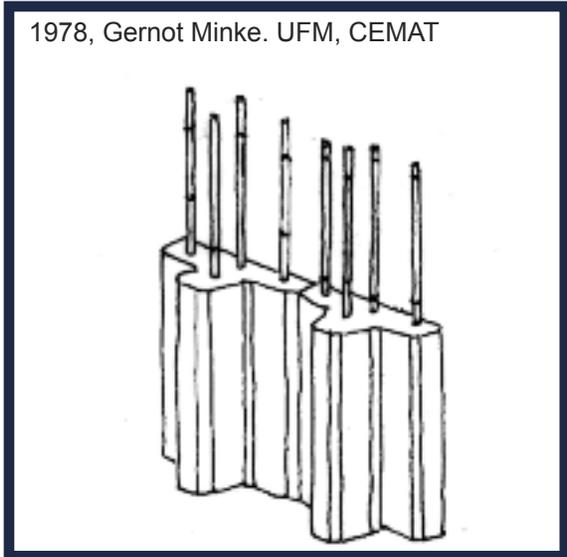


Fig. 57 Technique: pisé. Tiges de bambou fixées au soubassement et au chaînage couronne. (Minke, 2001)

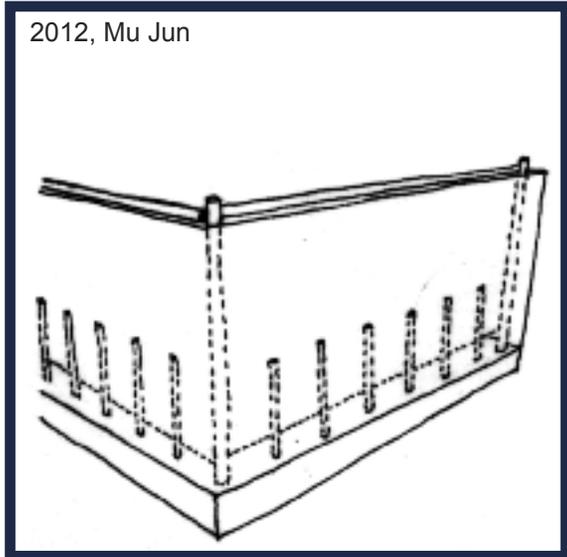


Fig. 58 Technique: pisé. Bois brut fixé au soubassement et au chaînage couronne.

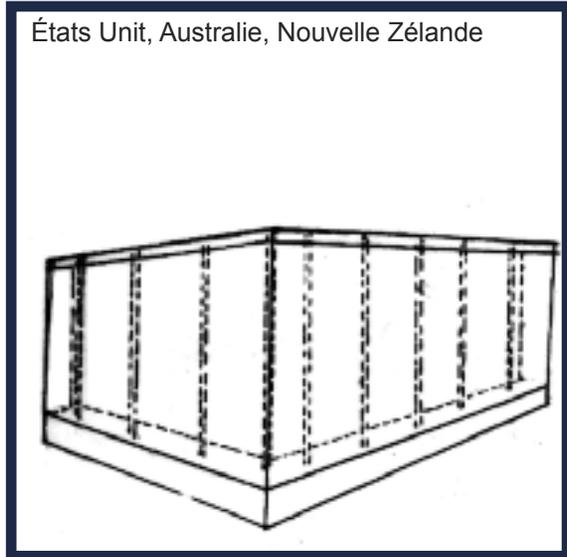


Fig. 59 Technique: pisé. Tiges d'acier fixées au soubassement et au chaînage couronne.

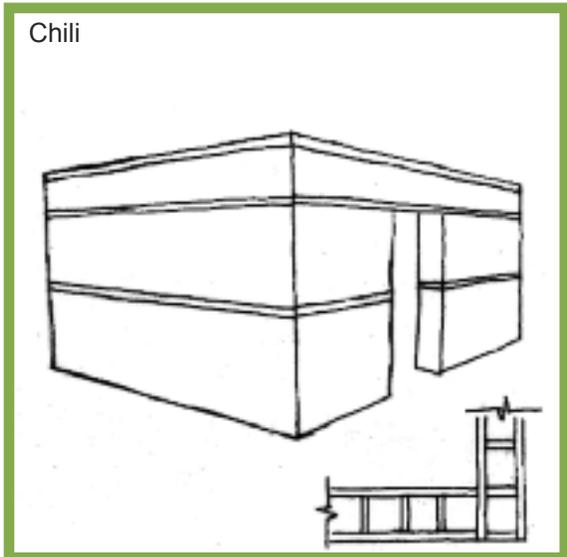


Fig. 60 Échelle en bois comme renforcement horizontal. (Rivera, Muñoz, 2012)

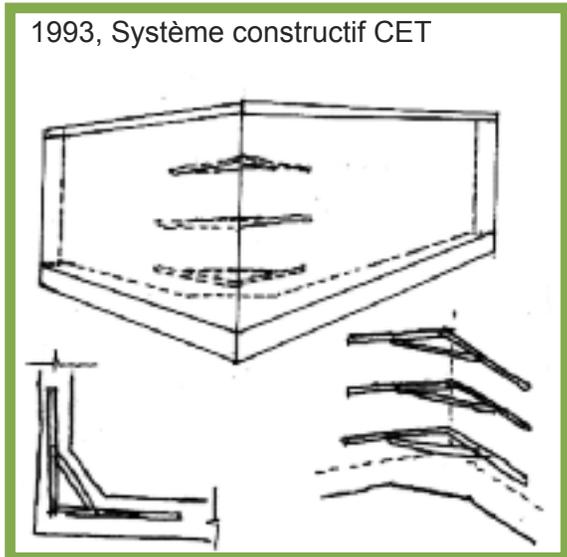


Fig. 61 Technique: pisé. Renforcement des angles avec des pièces de bois clouées entre elles. (Olarte, 1993)

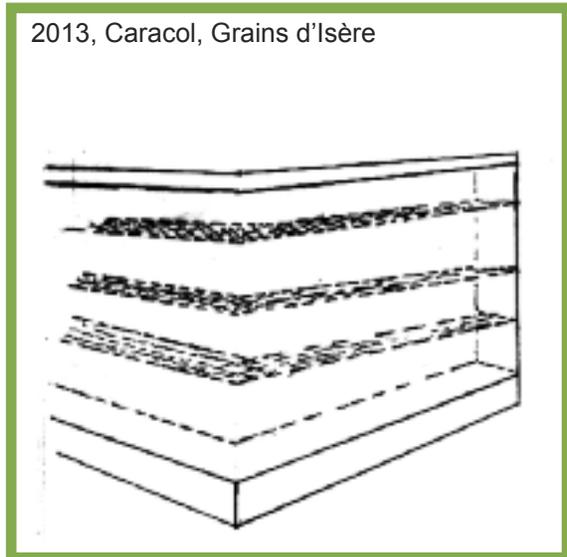


Fig. 62 Technique: terre coulée. Renforcement horizontal avec grilles.

## RENFORCEMENT AVEC ARMATURES

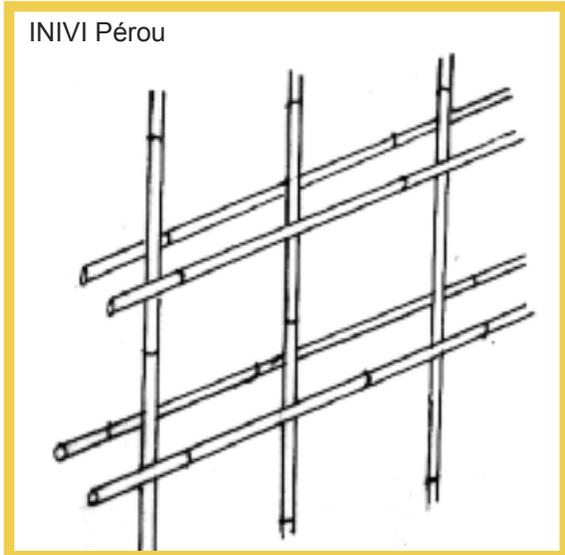


Fig. 63 Technique: adobe. Tiges de roseaux verticales et horizontales. (Olarte, 1993)

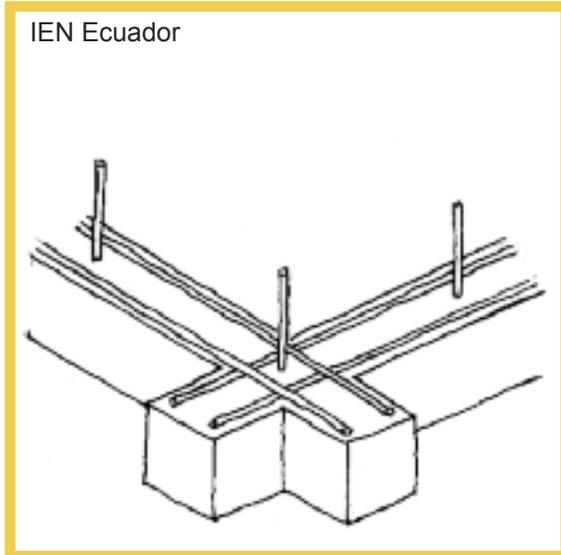


Fig. 64 Technique: adobe. Tiges de roseaux verticales et horizontales. (Olarte, 1993)

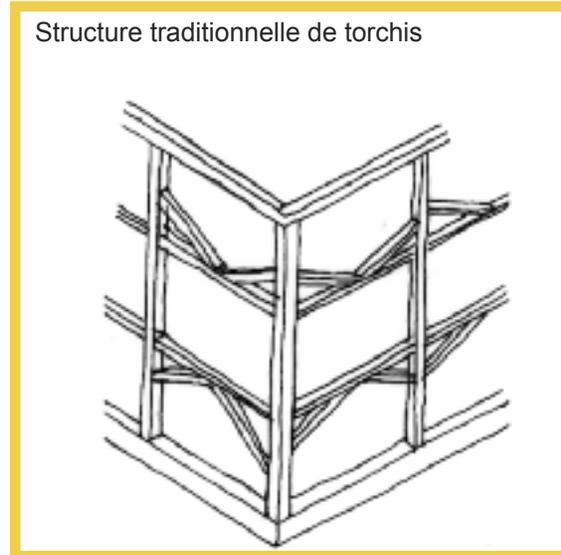


Fig. 65 Technique: torchis. Structure en bois. (Carazas, Rivero 2001)

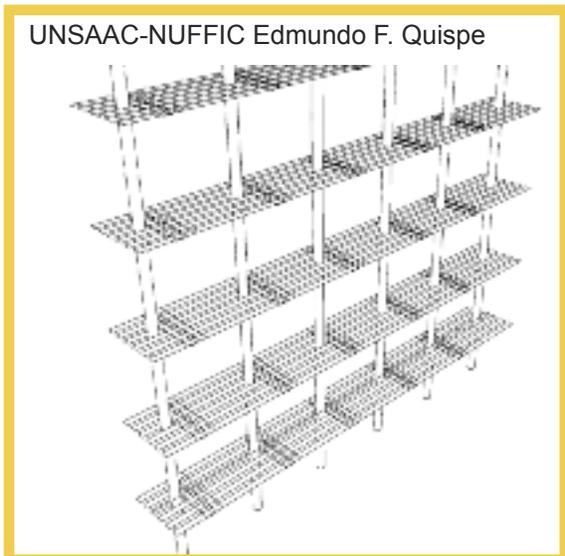


Fig. 66 Technique: adobe. Tiges de roseaux verticales et armatures horizontales de roseaux aplatis. (Sovero, Quispe)

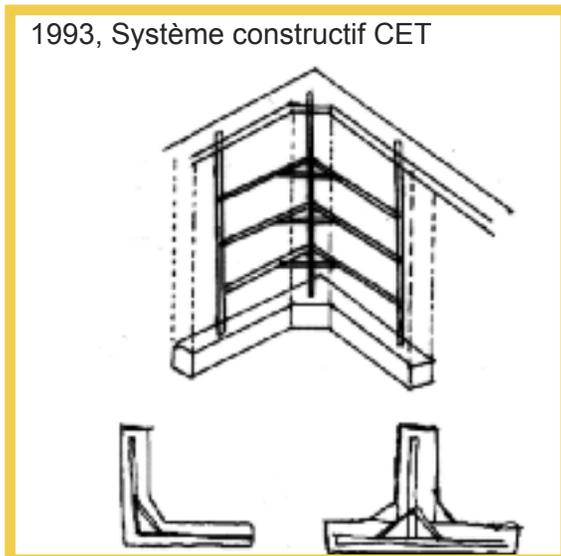


Fig. 67 Technique: pisé. Armature du bois. Les pièces verticales sont fixées au soubassement et au chaînage couronne. (Olarte, 1993)

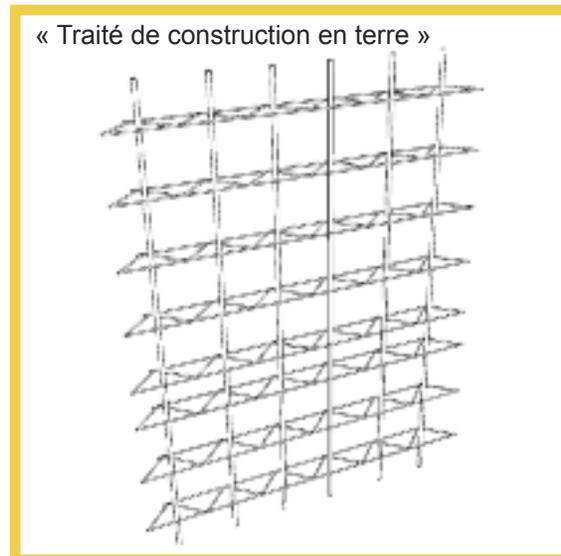


Fig. 68 Technique: BTC. Tiges verticales et armatures horizontales entre les assises, dans le Traité page 260. (Houben, Guillaud, 2006)

## RENFORCEMENT AVEC ARMATURES

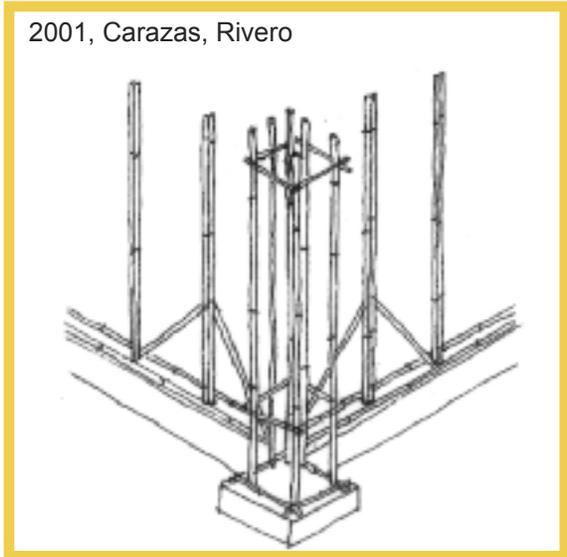


Fig. 69 Technique: torchis. Armature des tiges de bambou verticales fixées au soubassement, tiges en diagonale et tiges horizontales. (Carazas, 2001)



Fig. 70 Technique: terre coulée. Armature des lames de bambou. (Aranda 2014)

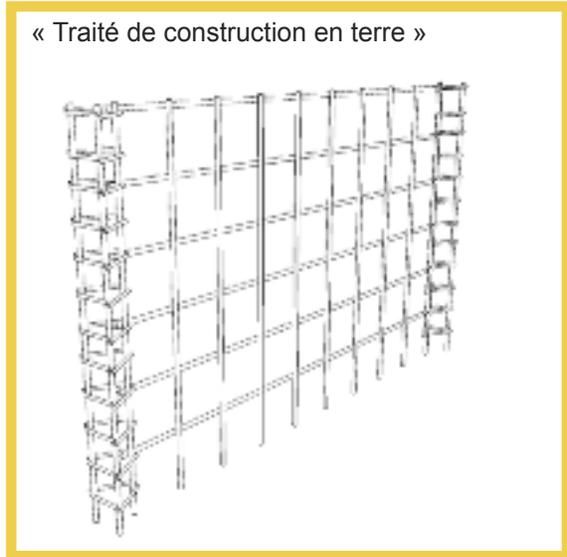


Fig. 71 Technique: terre coulée. Armature pour terre coulée sans une autre référence, dans le Traité page 183. (Houben, Guillaud, 2006)



Fig. 72 Technique: terre coulée. armature des tiges d'acier qui forment des échelles dans le sens transversal des murs et qui sont reliées entre elles par d'autres tiges horizontales.

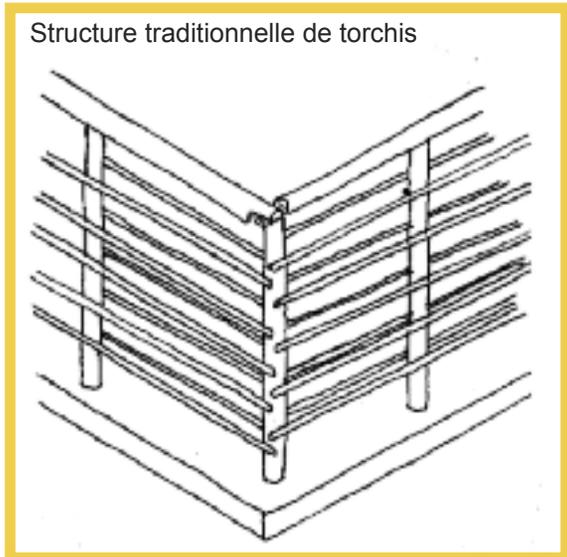


Fig. 73 Technique: torchis. Ossature bois avec tiges de roseaux horizontales. (Carazas, Rivero 2001)

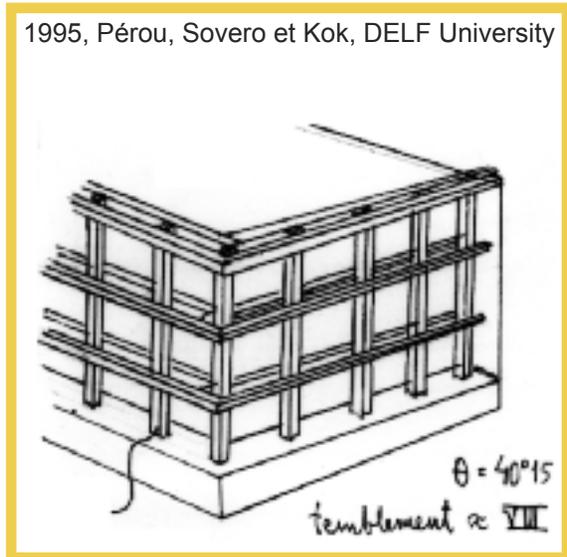


Fig. 74 Technique: pisé. Armature en bois scié. (Kok, Sovero, 1996)

## RENFORCEMENT AVEC DES GRILLES

1982, Lynn S. Nelson

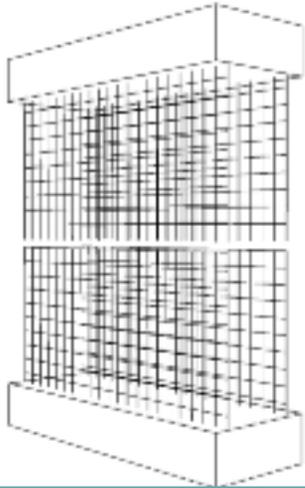


Fig. 75 Technique: terre coulée. Grille métallique comme renforcement de murs. (May, 1981)

1982, Lynn S. Nelson

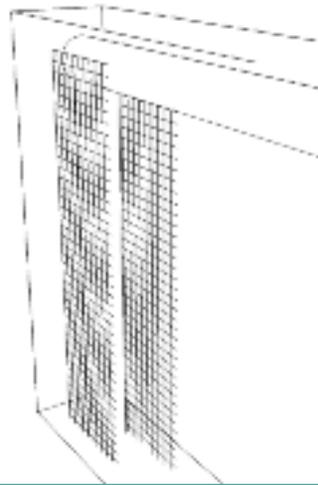


Fig. 76 Technique: terre coulée. Grille métallique fixée sur une ossature en bois. (May, 1981)

1981, Frederick A. Webster

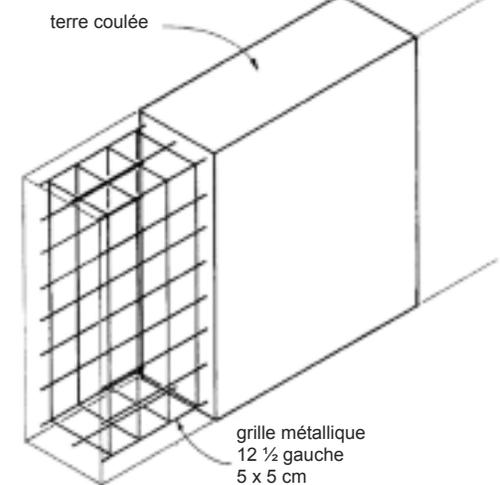


Fig. 77 Technique: terre coulée. Grille métallique comme renforcement de murs. (Webster, 1981)

Maxeh Terracreto

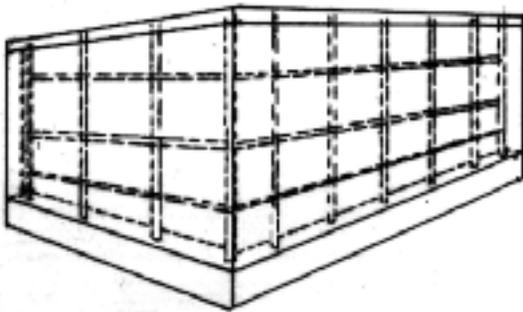


Fig. 78 Technique: terre coulée. Armature de tiges d'acier. (Maxehterracreto 1, 2010)

Géogrille Pérou

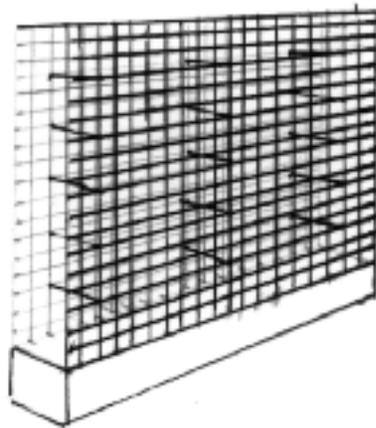


Fig. 79 Technique: adobe. Géogrille dans les deux faces du mur fixées entre elles avec de la ficelle.

Chili

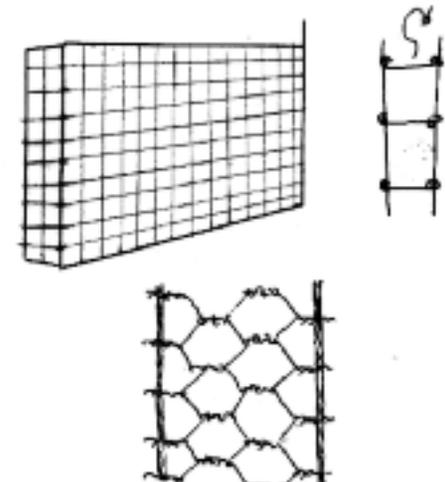


Fig. 80 Technique: adobe. Treillis d'acier électro-soudé et grille flexible métallique comme renforcement, dans les deux faces du mur. (Rivera, Muñoz, 2012)

## RENFORCEMENT VERTICAL

Murs non porteurs

**Gernot Minke**

**1978, Guatemala : Pisé armée**

En 1978 le Centre de Recherche de Construction Expérimentale (FEB) de l'Université de Kassel en collaboration avec l'Université de Francisco Marroquin (UFM) et le Centre de Technologie Appropriée (CEMAT) ont développé et construit une maison en pisé renforcé avec des tiges de bambou au Guatemala. Ce renforcement intégré aux murs a permis une résistance aux forces horizontales du séisme quatre fois plus importante qu'un mur de 14 cm d'épaisseur.

Les murs sont constitués des éléments indépendants en forme de T, fig. 81 ; de 80 cm de longueur, 30 de largeur au milieu et 14 cm d'épaisseur. Avec 4 tiges de bambou de 2-3cm de diamètre pour chaque élément. Les tiges sont incrustées au soubassement et fixées au sommet des murs à un chaînage en bois. Chaque élément bouge de manière indépendante pendant un séisme, ce qui permet à la structure de se déformer et de dissiper de l'énergie, constituant une structure flexible à partir des éléments massifs. La toiture n'apporte aucune type de charge aux murs vu qu'elle est supporté par des poteaux indépendants

Avec le même principe de toiture structuralement indépendante la FEB et

l'Université de Santiago de Chile ont développé et construit en 2001 à Alhué au Chili, une maison en pisé de 55m<sup>2</sup>. Les murs en forme de L et de U obtiennent une résistance supplémentaire contre le renversement et l'effondrement. En plus ses angles sont à 45 degrés ce qui rends les coins plus rigides. Les murs sont renforcés avec des tiges de bambou de 2,5-5cm de diamètre, fixées comme dans le projet précédent au soubassement et au chaînage supérieure. (Minke, 2001, p19-22).

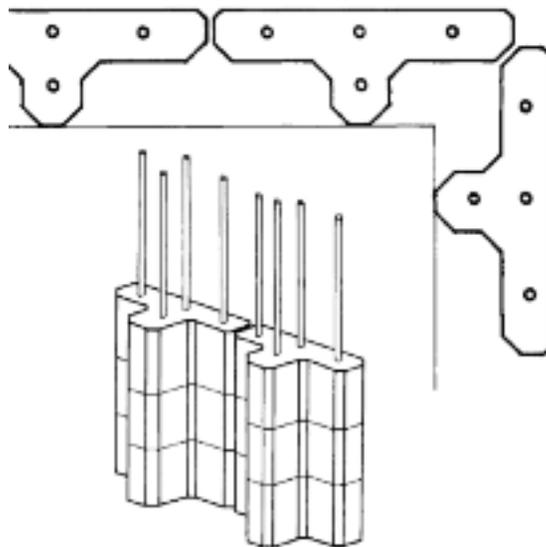


Fig. 81 Éléments de murs en pisé avec 4 tiges en bambou. (Minke, 2001, p19-22)



Fig. 82 Murs en construction avec renforts internes. (Minke, 2001, p19-22)



Fig. 83 Renforts internes et chaînage. (Minke, 2001, p19-22)

## RENFORCEMENT VERTICAL

Murs porteurs

### Barros, Imhoff 2010, Chili : Pisé post tendu

En 2010 l'architecte BARROS de l'Université de Chili et l'architecte IMHOFF de l'Université Technique Federico Santa María (UTFSM) ont amené un projet de recherche de pisé post tendu stabilisé au 10% de ciment. Il ont testé deux prototypes échelle 1:6 dans la table vibrante de l'UTFSM. Les modèles ont résisté sans s'effondrer à la simulation du séisme de Kobe (0.8g). Des tiges en acier à l'intérieur des tubes en plastique renforcent les murs. Les tiges sont également fixées au

soubassement, mises en tension et fixées au chaînage supérieur des murs. Les coins des murs sont aussi à 45 degrés pour un des prototypes. (Barros, Imhoff, 2010)

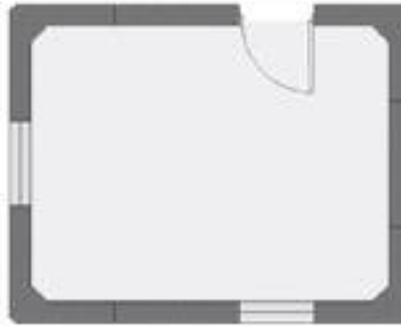


Fig. 84 Plan de modèle avec coins en 45°. (Barros, Imhoff, 2010)

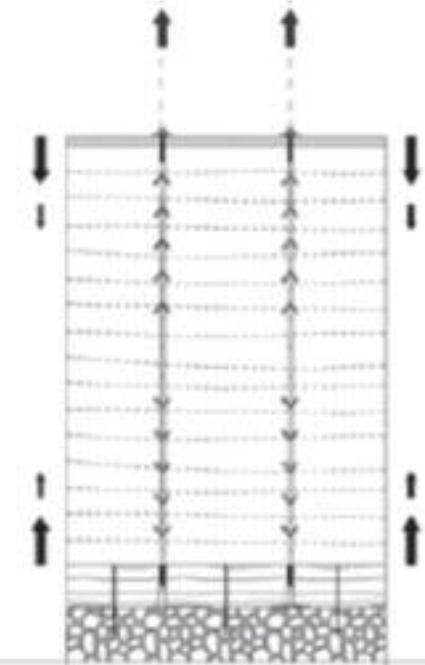


Fig. 85 Section de mur post tendu. (Barros, Imhoff, 2010)

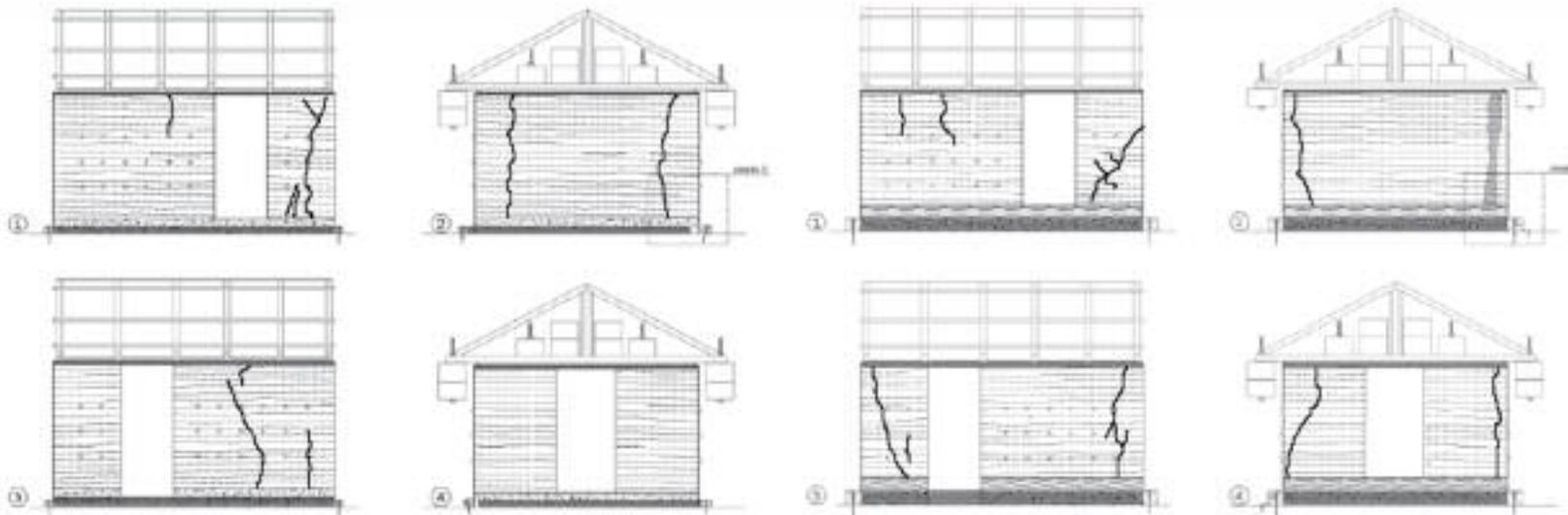


Fig. 86 Fissures observées après les tests dans la table vibrante. (Barros, Imhoff, 2010)

## RENFORCEMENT VERTICAL

Murs porteurs

Mu Jun

2012, Chine : Pisé armé

Après un séisme de magnitude 6,1 le village Maan Qiao dans la région de Sichuan a été l'objet de plusieurs travaux de reconstruction. L'architecte Mu Jun a proposé et construit des maison en pisé avec des renforcement verticaux en bois. Des poteaux en bois fixés au soubassement et au chaînage couronne en bois. Des tiges en bois sont aussi placées à l'intérieur du mur. Des armatures en lames de bambou font un renforcement horizontal. (House DIY)



Fig. 87 Chaînage couronne en bois. (House DIY)

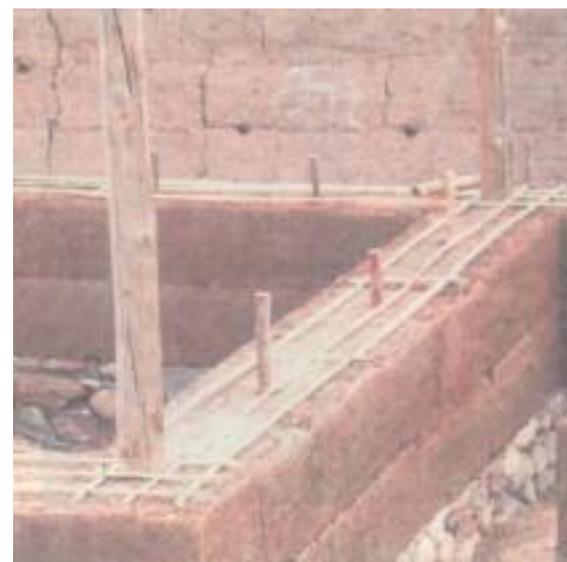


Fig. 88 Poteaux dans les coins, tiges verticales et renforcement horizontal. (House DIY)



Fig. 89 Chantier en cours. (1u1v CUHK, 2013)



Fig. 90 Chantier en cours. (1u1v CUHK, 2013)

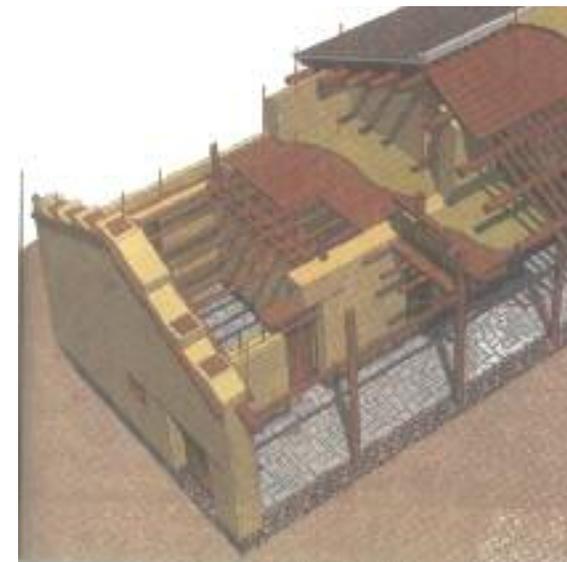


Fig. 91 Perspective de la maison proposée. (House DIY)

## RENFORCEMENT HORIZONTAL

### Murs porteurs

Le Chili est un pays avec une forte sismicité. On peut trouver des bâtiments historique en adobe avec des inclusions bois, comme on peut voir dans les fig. 94 et 95. Pour les nouvelles constructions en adobe il est recommandé de concevoir les constructions comme un système intégrale avec une série de dispositifs et critères parasismiques comme : régularité en plan, un élancement de 1:7 est recommandé pour les murs en adobe, renforcement horizontal en forme d'échelle à chaque mètre, linteaux correctement dimensionnés, toiture légère et diaphragmée, un chaînage couronne, etc. (Rivera, Muñoz, 2012)

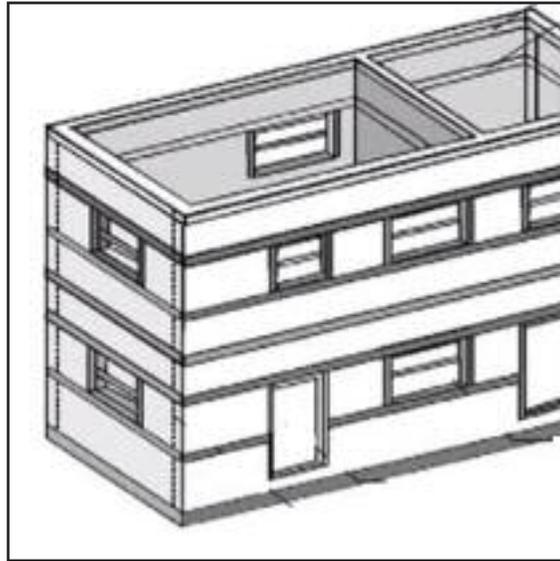


Fig. 92 Dessin avec des renforcements horizontaux. (Langenbach, 2012)

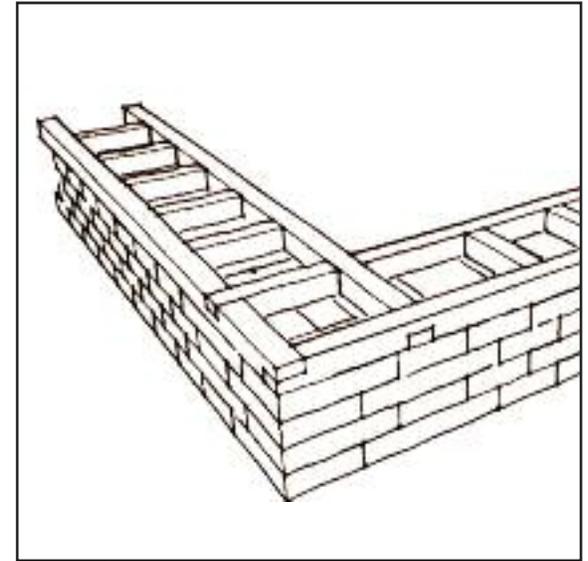


Fig. 93 Échelle en bois comme renforcement horizontal. (Rivera, Muñoz, 2012)



Fig. 94 Construction en adobe avec des renforcements horizontaux. (Rivera, Muñoz, 2012)



Fig. 95 Église en adobe avec des renforcements horizontaux. (Rivera, Muñoz, 2012)

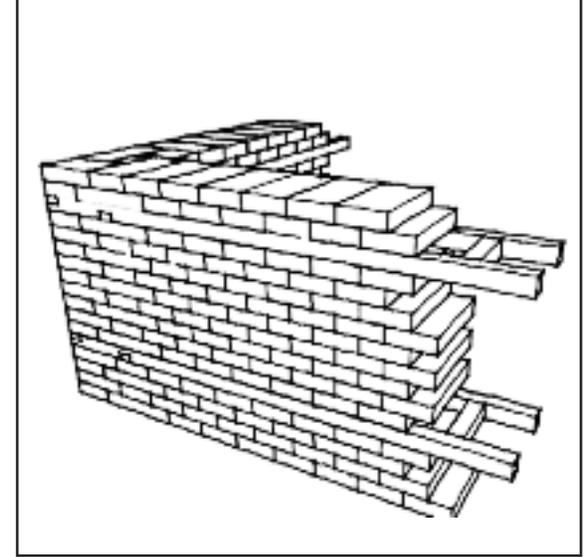


Fig. 96 Inclusions bois dans murs en adobe à chaque mètre. (Rivera, Muñoz, 2012)

## RENFORCEMENT HORIZONTAL



Fig. 97 Fort du 20eme siècle au Besham au Pakistan. (Langenbach, 2007)



Fig. 98 Nouvelle construction au Pakistan avec renforcement horizontal. (Langenbach, 2012)

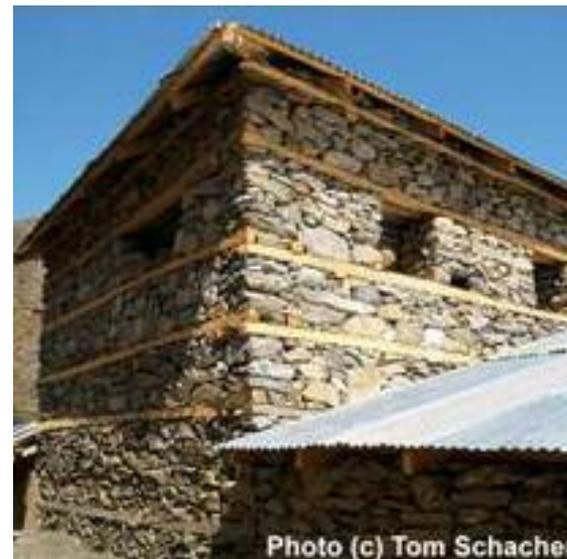


Fig. 99 Nouvelle construction au Pakistan avec renforcement horizontal. (Photo: Tom Schacher 2007) (Langenbach, 2007)

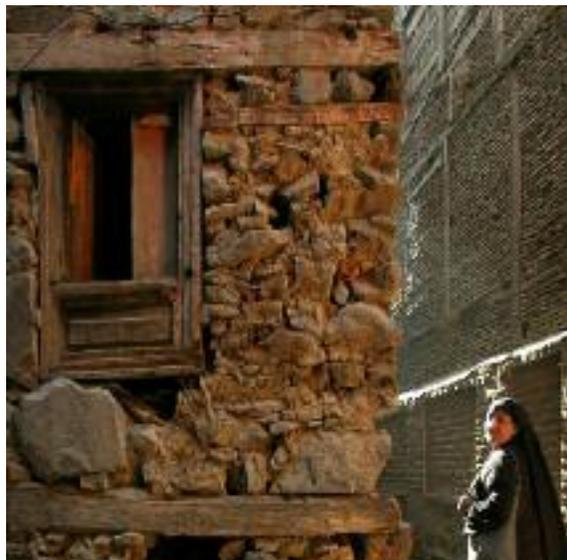


Fig. 100 Culture constructive « Tag » de Kashmir avec renforcement horizontal en bois. (Langenbach, 2007)



Fig. 101 Culture constructive « Tag ».(Langenbach, 2012)

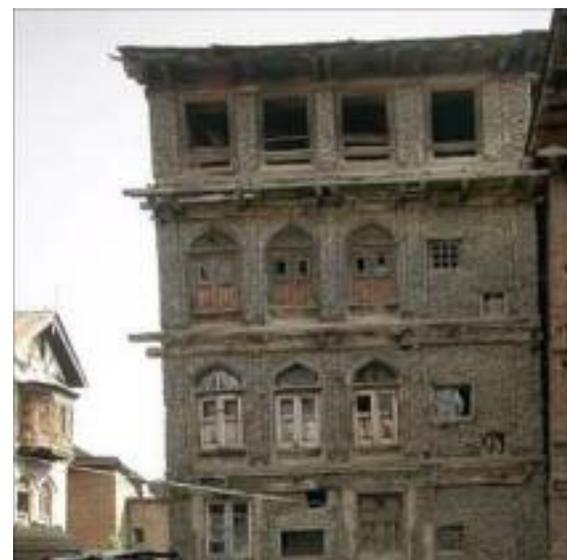


Fig. 102 Culture constructive « Tag », Srinagar, Kashmir. (Langenbach, 2012)

## RENFORCEMENT HORIZONTAL

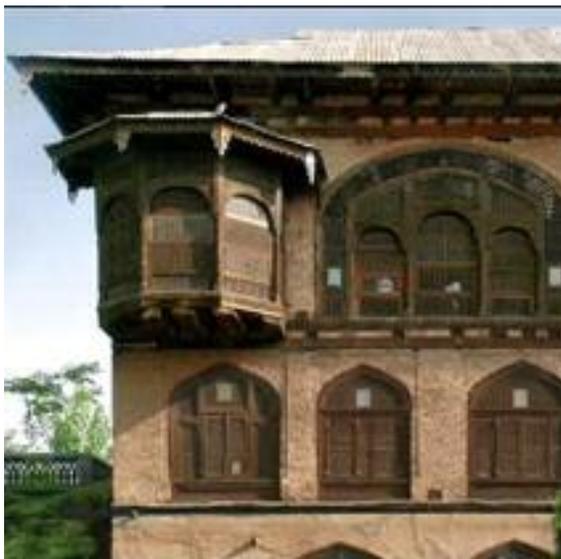


Fig. 103 Culture constructive « Tag ». (Langenbach, 2012)

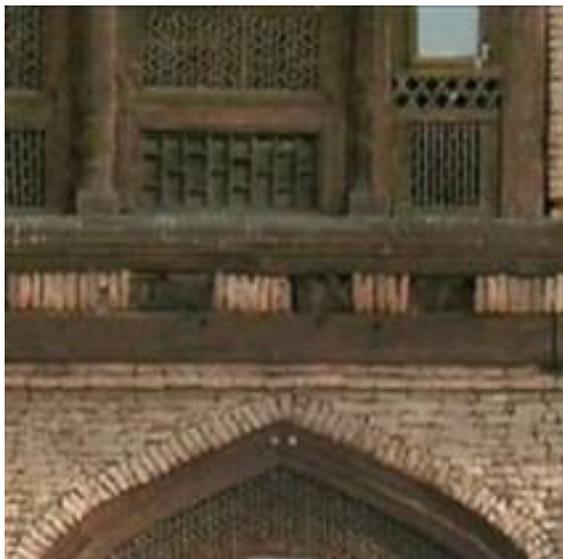


Fig. 104 Culture constructive « Tag ». (Langenbach, 2012)



Fig. 105 Culture constructive « Tag ». (Langenbach, 2012')



Fig. 106 Culture constructive « Tag ». (Langenbach, 2012)



Fig. 107 Culture constructive « Tag ». (Langenbach, 2012)



Fig. 108 Culture constructive « Tag ». Il n'y a pas de renforcement vertical. (Langenbach, 2012)

## RENFORCEMENT AVEC DES ARMATURES



Fig. 109 Haïti. (Langenbach, 2012)



Fig. 110 Église à colombages en Haïti. (Langenbach, 2012)

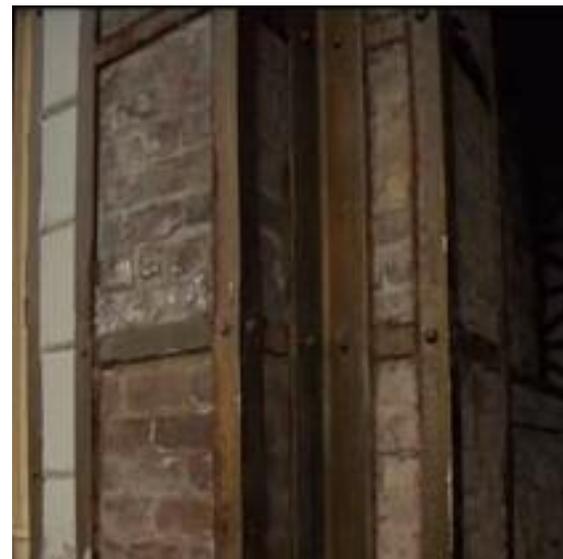


Fig. 111 Détail du colombage métallique. (Langenbach, 2012)

## RENFORCEMENT AVEC DES GRILLES

### Murs porteurs

#### Frederick A. Webster 1981 Terre coulée armée

Frederick A. Webster a donné un exposé intitulé «Reinforced poured adobe and its applicability to earthquake resistant construction» (Adobe coulée renforcé et son application dans les construction parasismiques). Il a démontré analytiquement qu'il est possible de construire des murs en terre coulée armée porteurs en zone sismique 4, en répondant à toutes les exigences du UBC. Des murs de 2.4m de hauteur et 40 cm d'épaisseur avec une grille métallique de 12 ½ gauche et 5 centimètres d'espacement sont capables de résisté aux forces sismiques perpendiculaires et parallèles à l'axe du mur demandé par le UBC. Voir la [fig. 112](#). Webster a mentionné que le type de coffrage utilisé et le retrait du matériaux étaient les principaux problèmes à résoudre. Comme solution il a proposé l'utilisation de fibres dans la masse, de plastifiants et de bambou à la place de l'acier.

Wester a mentionné la nécessité de faire une série de test de laboratoire pour connaître le comportement dynamique de la terre coulée. Et il a recommandé la construction de modèle en terre coulée en échelle 1:2 dans le Vallée Impérial de Californie où l'on peut avoir des résultat dans une courte période de temps. (Webster, 1981)(May, 1981)

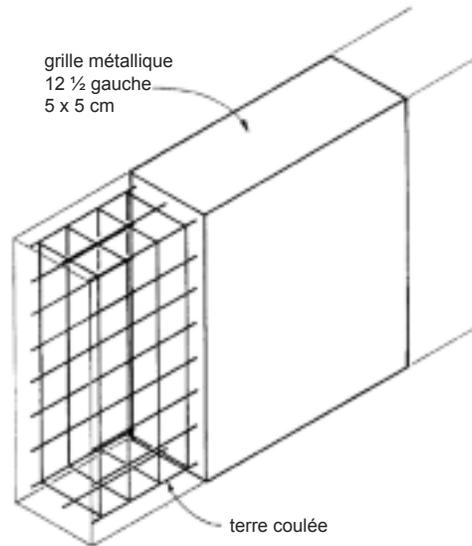


Fig. 112 Proposition d'emplacement de la grille métallique à l'intérieur des murs. (Webster, 1981)

Pour construire des mur non armée

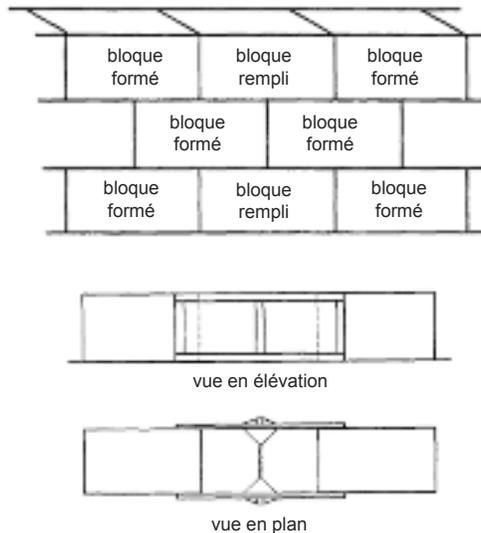


Fig. 114 Suite de la [fig. 113](#), On coule des blocs en laissant l'espace d'un bloque entre et entre 4 et 24 heures après on rempli les interstices. (Webster, 1981)

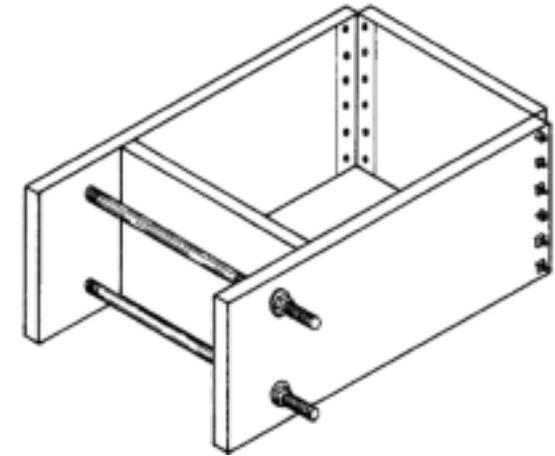


Fig. 113 Belshaw M. a développé ce moule pliable pour former des blocs de terre coulée directement dans le mur. Suite dans la [fig. 114](#). (Webster, 1981)

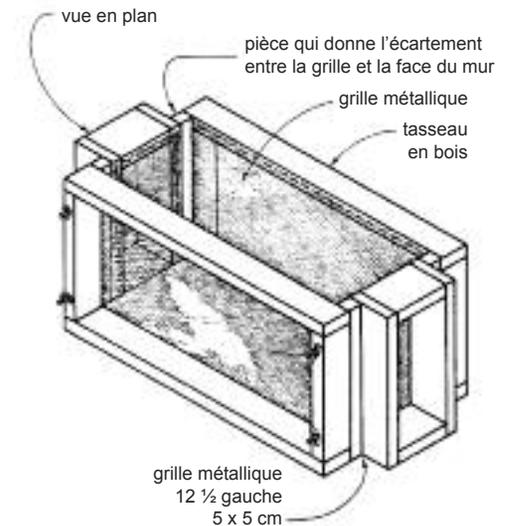


Fig. 115 Moule modifié par Webster à partir du moule de Belshaw. Ce moule permet de construire des murs renforcés avec des grilles. (Webster, 1981)

## RENFORCEMENT AVEC DES GRILLES

### Murs porteurs

Lynn S. Nelson, 1982 Terre coulée armée

En 1982 Lynn S. Nelson a construit une maison en terre coulé à Pacheco, California. Avec toutes les étapes mécanisées, une équipe de trois personnes a coulé tous les murs en deux jours. Il a proposé d'abord de construire la maison avec des murs porteurs comprenant deux grilles métalliques à l'intérieur des murs, écartés de la face de murs cinq centimètres. Les grilles ont été fixées à un soubassement et un chaînage supérieur en béton. Voir fig. 116. Les autorités américaines n'ont pas approuvé ce système constructif du au manque d'essais de laboratoire. Nelson a donc changé le système constructif. Il a utilisé une structure bois à l'intérieur des murs. Voir fig. 116 et 118. (Nelson, 1981)(May, 1981)

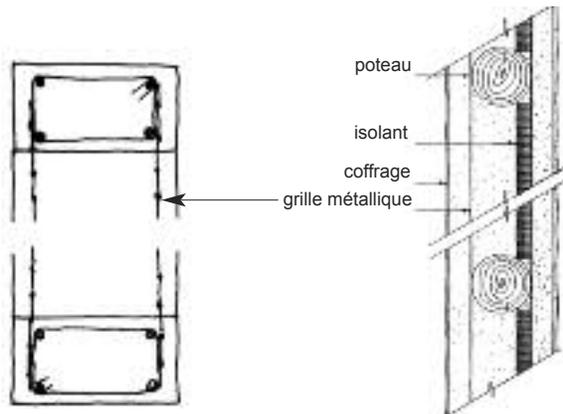


Fig. 116 À gauche interprétation de l'auteur du premier système constructif proposé. À droite le système construit. (Patent US4365451 A, 1980)

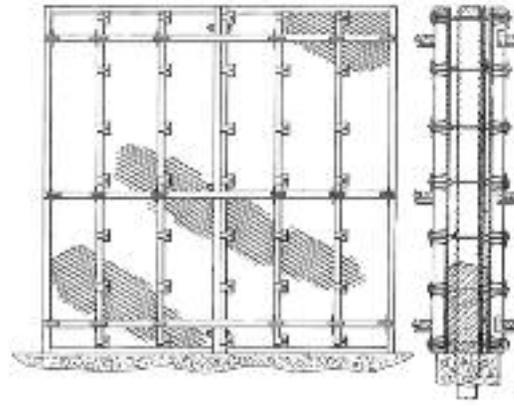


Fig. 117 Vue en élévation et de côté de coffrage respirant en bois et grille métallique. Nelson a décoffré 3 semaines après avoir coulé. (Patent US4365451 A)

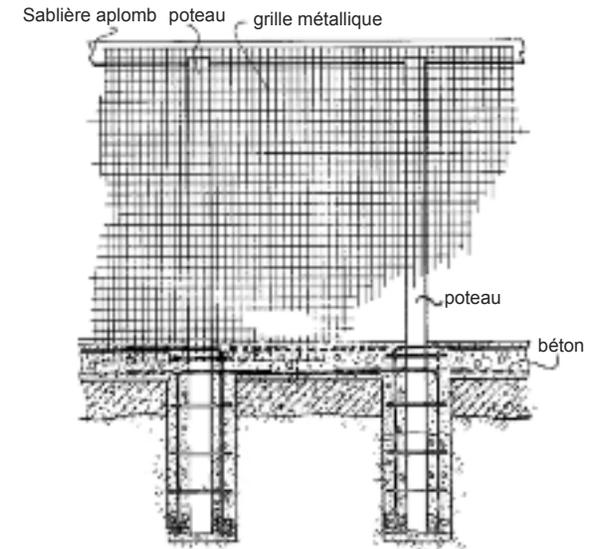


Fig. 118 La grille est fixée au cadre en bois, la terre coulée couvre le poteau et la grille de 5 centimètres à chaque côté. (Patent US4365451 A, 1980)

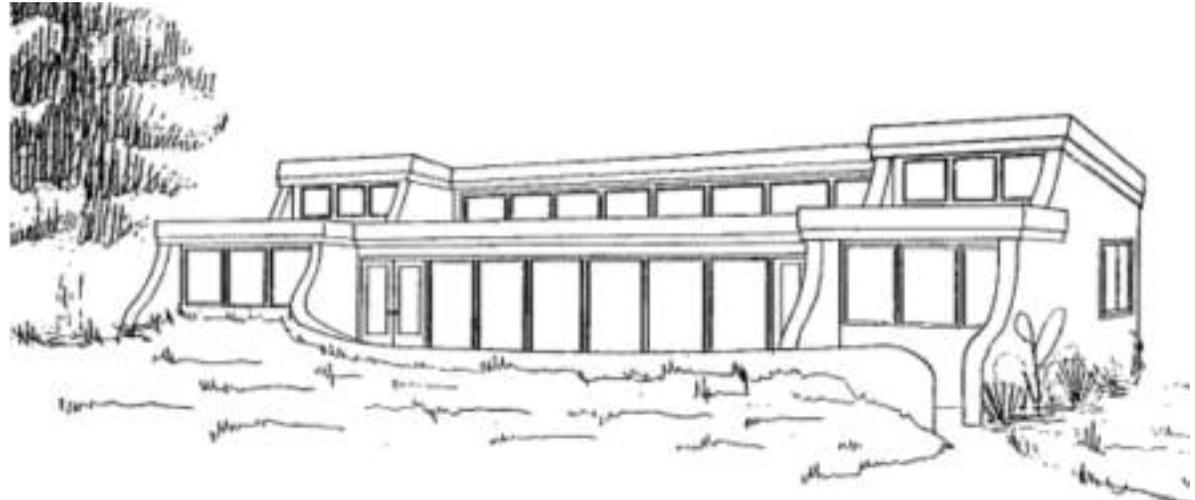


Fig. 119 Dessin de la maison solaire passive en terre coulée construit par Nelson, nommé «Passive solar poured adobe residence». Pacheco est à l'est de la région de San Francisco, le UBC le classe en zone de sismicité 4. La surface construite est de 167m<sup>2</sup>, murs de 2,7 mètres de hauteur et de 35 cm d'épaisseur. Ils ont une isolation intégrée de panneaux de polystyrène de 5 centimètre d'épaisseur. Nelson a utilisé la terre du site stabilisée au bitume et avec de la paille. (May, 1981)

## RENFORCEMENT AVEC DES GRILLES

Murs porteurs

**Maxeh Terracreto**

**2010, Mexique : Terre coulée armée**

Cette maison a été construite au Mexique. C'est une maison en terre coulée armée avec auditive Maxeh.

La maison a deux étages. Ses murs sont porteurs et ils ont un renforcement avec des tiges d'acier qui forment une grille. Je n'ai pas plus d'information sur cette maison.



Fig. 121 Coffrage des murs. (Maxehterracreto 1, 2010)



Fig. 122 Armature des murs. (Maxehterracreto 1, 2010)



Fig. 120 Armature des murs. (Maxehterracreto 1, 2010)



Fig. 123 Intérieur de la maison. (Maxehterracreto 1, 2010)



Fig. 124 Maison finie. (Maxehterracreto 1, 2010)

## RENFORCEMENT AVEC DES

## ARMATURES

Murs porteurs

Architecte Wilfredo CARAZAS

Architecte Alba RIVERO

2001, Guatemala : Torchis CEREN

Dans le cadre du "programme de reconstruction de maisons au Salvador", à la demande de MISEREOR et FUNDASAL, les architectes Alba RIVERO et Wilfredo CARAZAS ont conçu la «Maison en torchis Ceren renforcé», adaptée au contexte sismique de ce pays. La maison a un module de basée de 10,24m<sup>2</sup>, et peut évoluer jusqu'à 44,2m<sup>2</sup> en fonction des conditions économiques, de la disponibilité des matériaux et du temps. La conception de cette maison est basé sur le développement d'un nouvelle technique constructif baptisée "CEREN", en hommage aux anciens habitants dans la région du même nom au Salvador. Cette technique prend en compte les formes de construction propres de cette civilisation et en les adaptant aux formes et matériaux contemporains. En 2001 un premier prototype a été construit.

Un séisme de magnitude 7,1 dans la région a permis de prouvé la pertinence de la conception de cette maison. Les 4 constructions "CEREN" ont bien résisté au séisme sans présenter des dommages structuraux et sans fissures.

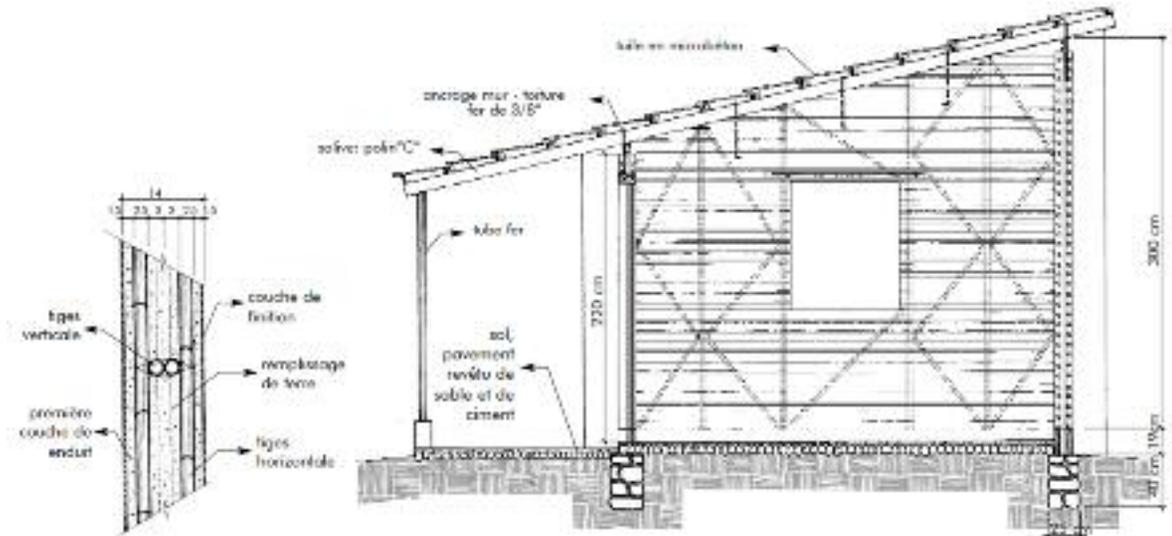


Fig. 125 Coupe d'une section de mur et coupe de la maison. Les contreventements et les colonnes aide à la maison à résister aux charges sismiques. (Carazas, Rivero 2001)

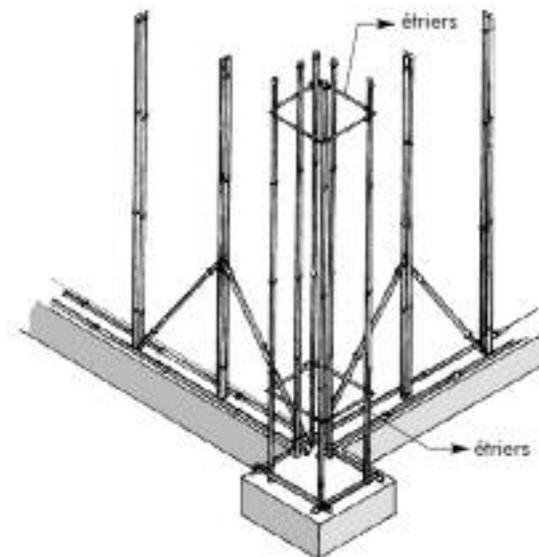


Fig. 126 Tiges verticales de colonnes et de murs avant l'installation des tiges horizontales. Fixation de contreventements. (Carazas, Rivero 2001)

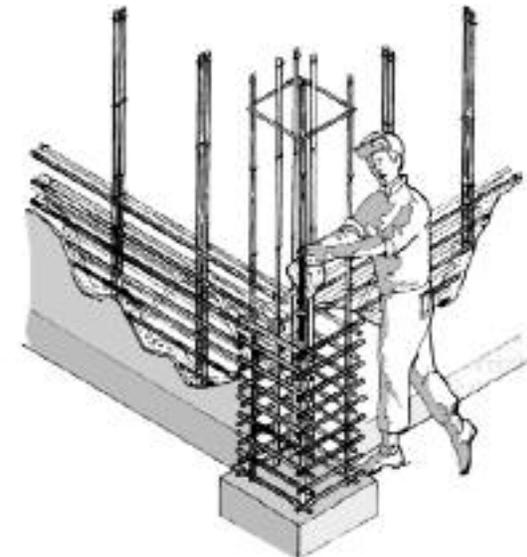


Fig. 127 Les barres horizontales sont séparées d'entre 6 à 8 cm. Quand la fixation attend les 50 cm de hauteur les colonnes et les murs sont remplis de mortier de terre et de paille. (Carazas, Rivero 2001)

## RENFORCEMENT AVEC DES

## ARMATURES

Murs porteurs

**Ing. Sovero / Dr. Kok Delf University  
1995 Pisé armée**

Entre 1993 et 1995 Ing. G. Sovero de l'Université Nationale San Antonio Abad del Cusco et le Dr. A. W. M. Kok de l'Université Technologique de Delf ont dirigé un projet de recherche avec l'objectif général de développer et tester des technologies alternatives parasismiques. Entre autres activités de ce projet, ils ont construit et testé deux prototypes échelle 1:2, nommé MSM1 et MSM2. Les prototypes ont résisté une inclinaison de  $40^{\circ}15'$  sans collapse, dans un essai semi-statique en plate-forme pliable. L'effet de la pesanteur avec cette inclinaison a donné au prototypes les forces équivalentes à un tremblement de terre d'intensité VII. Le prototype MSM1 et MSM2 sont à deux étages, de section carré en plan, de 2,31 mètres. Le premier étage est en pisé armé avec des poteaux d'une bois appelé «aguano», de section carré de 5 cm. MSM1 avec 20 poteaux et MSM2 avec 12. Et à leur sommet un chaînage en bois d'eucalyptus relie tous les poteaux. Entre les deux section du chaînage il y a un remplissage de béton maigre. Le deuxième étage est construit en torchis. MSM1 et MSM2 ont montré un comportement ductile, le chaînage horizontal a réduit les fissures dans le murs en faisant travailler

tous les poteaux de manière simultanée. L'addition de paille dans les murs en pisé a réduit également les fissures dans le murs. (Kok, Sovero, 1996)



Fig. 128 Prototype MSM2 à  $40^{\circ}15'$  pendant le test semi-statique. (Kok, Sovero, 1996)

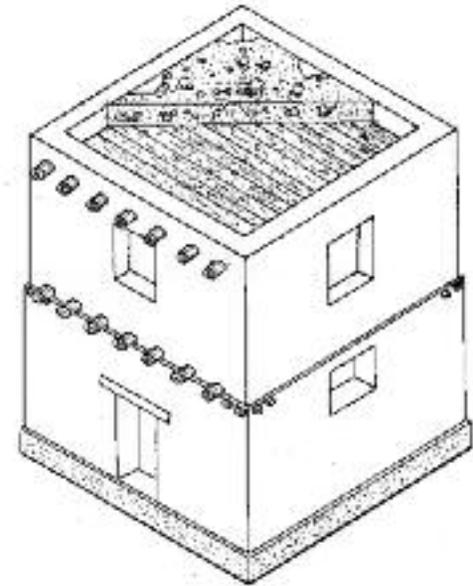


Fig. 129 Perspective du prototype. (Kok, Sovero, 1996)

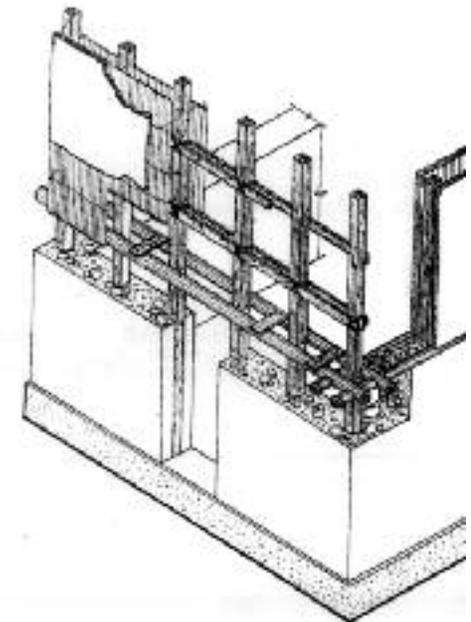


Fig. 130 Dessin qui montre l'armature à l'intérieur du mur en pisé. (Kok, Sovero, 1996)

## RENFORCEMENT AVEC DES

### ARMATURES

Murs porteurs

#### Système constructif CET

##### 1993 Pisé armée

Entre 1988 et 1993 l'architecte Jorge Luis de Olarte a travaillé dans le projet de recherche dans une première phase au Pérou à l'Université Nationale d'Ingénierie. En suite dans le Centre péruvien-japonais des recherches sismiques (CISMID). Et finalement dans l'Institut de sciences de la construction Eduardo Torroja. L'architecte Olarte a développé et testé un système constructif modulable tridimensionnellement, en pisé armée et torchis, qui donne comme résultat des constructions avec un centre de gravité bas. Les murs en pisé, pour le premier étage, sont porteurs. Ils sont en forme de L, T, X, S dans leur section (donc auto-stables). Les murs du deuxième et troisième étage sont en torchis, permettant des constructions jusqu'au 10,5 mètres de hauteur.

Les murs en pisé ont des inclusions bois horizontales et verticales adaptées de la culture constructive de la région de Cajamarca au Pérou. Les sections verticales ont trois fonctions. La première est attacher le soubassement au mur et de le faire bouger ensemble au moment du séisme. La deuxième est de fixer les murs au plancher-diaphragme, pour éviter les déformations et mouvement en torsion de la structure. La troisième et donner une certaine flexibilité au murs.

Les murs en pisé ont une hauteur de 2,40 mètres y inclus le soubassement. Chaque mur a trois renforcements horizontaux. Ils ont comme fonction contrôler les déformations dans le plan du mur perpendiculaire au forces du séisme et éviter les fissures verticales. Les fig. 61 et 67 montrent les différents types d'armatures développés. Pendant le projet, l'architecte Olarte a testé des modèles à échelle réduite. Chaque modèle a suivi trois cycles de différentes combinaison de fréquences et accélérations dans une table vibrante. Les structures n'ont pas souffert des endommagements considérables. Tous les modèles ont montré leur premières fissures dans une intensité VI de l'échelle modifiée de Mercalli (MM). Aucun modèle a cédé. (Olarte, Guzman, 1993)



Fig. 131 Maison construit avec le Système constructif CET. (Olarte, Guzman, 1993)



Fig. 132 Murs en pisé en construction avec des inclusions bois. (Olarte, Guzman, 1993)



Fig. 133 Maison construite avec le Système constructif CET. (Olarte, Guzman, 1993)

## RENFORCEMENT AVEC DES

### ARMATURES

Murs porteurs

Docteur Yolanda Aranda

2014 Terre coulée armée

La Docteur Yolanda ARANDA et une équipe de l'Université de Tamaulipas au Mexique, ont développé une maison en terre coulée, de 52m<sup>2</sup>, construit dans le campus de l'Université. Les murs de la maison sont porteurs, de 25cm d'épaisseur et renforcés avec une armature en bambou. Les renforcements verticaux sont huit lames de bambou, de 5 x 18 mm, attachées entre elles par des anneaux en acier. Deux lames par coin forment une section carré du renforcement vertical, qui est fixé à la dalle de cimentation, et aide à fixer la toiture. Voir figure 134 et 135. Des paires de lames de bambou, de 5 x 30mm, sont placées à chaque 60 centimètres, voir figure 135. Une terre de la région appelé «Champayán», stabilisée au 6% de ciment, a été utilisée pour la fabrication des murs sans besoins d'ajouter ni sable, ni graviers. Sa composition granulométrique est la suivante: 2,5% d'argile, 18% de silt, 79,5% de sable et graviers. Les échantillons des murs ont montré une résistance à la compression de 5,49MPa. Les murs ont été coulés en deux parties. La toiture est légère, faite de bambou avec une couche en béton de 5 cm d'épaisseur.

Les constructions couramment construites au Mexique en parpaing béton, utilisent une moyenne de 46kg de ciment par mètre carré, tandis que les murs utilisés en terre coulée prennent 23 kg/m<sup>2</sup>, c'est à dire 50% moins de ciment. (Aranda, 2014)



Fig. 134 Vue des renforts verticaux. Huit lames en bambou sont attachées entre eux par des anneaux en acier. (Aranda, 2014)



Fig. 135 Des paires de renforts horizontaux en bambou sont placées à chaque 60 centimètres. (Aranda, 2014)



Fig. 136 Décoffrage de première banchée. (Aranda, 2014)



Fig. 137 Vue de la maison terminée. (Aranda, 2014)

## RENFORCEMENT AVEC DES ARMATURES

### Poutres en terre coulée

En stage chez l'Auroville Earth Institute, Clémentine BROWNE et un équipe de l'institut ont testé à la flexion douce poutres, en deux groupes. Un groupe avec des poutres de 24x9x149cm avec renforcement simple, donc une seule couche de renforcement dans la partie base de la poutre (voir fig. 138 et 144). Un autre groupe, de 24x19x249 cm avec renforcement double : quatre tiges de bambou dans la partie base de la poutre et deux dans la partie supérieure (voir fig. 139 et 144). De chaque groupe, trois paires des poutres on été coulée, une en terre coulée<sup>1</sup> et une autre en béton<sup>2</sup> par paire. Une paire sans renforcement, une autre avec renforcement en bambou et la troisième avec renforcement en acier. Le renforcement est identique pour chaque paire de poutres. Le renforcement en acier a été le standard utilisé pour les poutres en béton.

Seules les poutres simples ont été testé jusqu'à la rupture. Néanmoins le comportement global de chaque type de poutre a pu être déterminé. Et se montre dans les graphiques de déflexion dans la fig. 143. Les poutres avec renforcement en acier ont reçu une charge maximale de 3.75 tonnes. À de 3250kg de charge, ils ont montré une déflexion de 9,03mm pour la poutre en

<sup>1</sup> Stabilisé à 7.5% de ciment. Donc 1:1,5:3:2:5, ciment:terre:sable:gravier 6:gravier12

<sup>2</sup> PCC=Portland Cement Concrete, 1=Ciment, 2=Sable, 4= Gravier ½”



Fig. 138 Emplacement d'armature simple en bambou. (photo : Browne)(Browne, 2013. p.30)



Fig. 139 Armature double, application de résine époxy. (photo : Browne)(Browne, 2013. p.31)



Fig. 140 Coulage de poutre en terre coulée avec armature double. (photo : Browne)(Browne, 2013. p.31)



Fig. 141 Poutre en terre coulée (19cm de hauteur) renforcé avec acier, chargé 3250kg avec une déflexion de 9.03mm (photo : Browne)(Browne, 2013. p.35)

## RENFORCEMENT AVEC DES

### ARMATURES

#### Poutres en terre coulée

terre coulée et 5,13mm pour la poutre en béton.

Les poutres renforcées en bambou était extrêmement élastiques. Elle ont fissuré beaucoup sans se casser. Pour les poutres en terre coulée les fissures (jusqu'à une dizaine par poutre) ont apparu sur le tiers central et elles se sont agrandies avec la charge. De sa part, les poutres en béton ont présenté de 3 à 6 failles.

Clémentine BROWNE affirme dans son rapport de stage que la terre coulée a une capacité à se déformer sans se rompre, qui la montre très ductile, comparé au béton.

En parallèle des tests de compression, d'absorptivité et de rétrécissement ont été fait. Les résultats sont les suivants:

	terre coulée		béton	
	humide	sec	humide	sec
compression	4,22MPa	6,42MPa	16,54MPa	21,73MPa
	2239,61 kg/m <sup>3</sup>		2360 kg/m <sup>3</sup>	
absorptivité	sec	humide	sec	humide
	0,17%	5,85%	0,28%	4,37%
	0.10%		0.02%	

(Browne, 2013. p. 26-38)

Poutre	terre coulée		béton	
	simple	double	simple	double
Charge maximale	175-250 kg	150-250 kg	450-750 kg	900-1250 kg

Fig. 142 Table de charge maximale pour type de poutre. (Browne, 2013. p.35)

## Déflexion en fonction de la charge

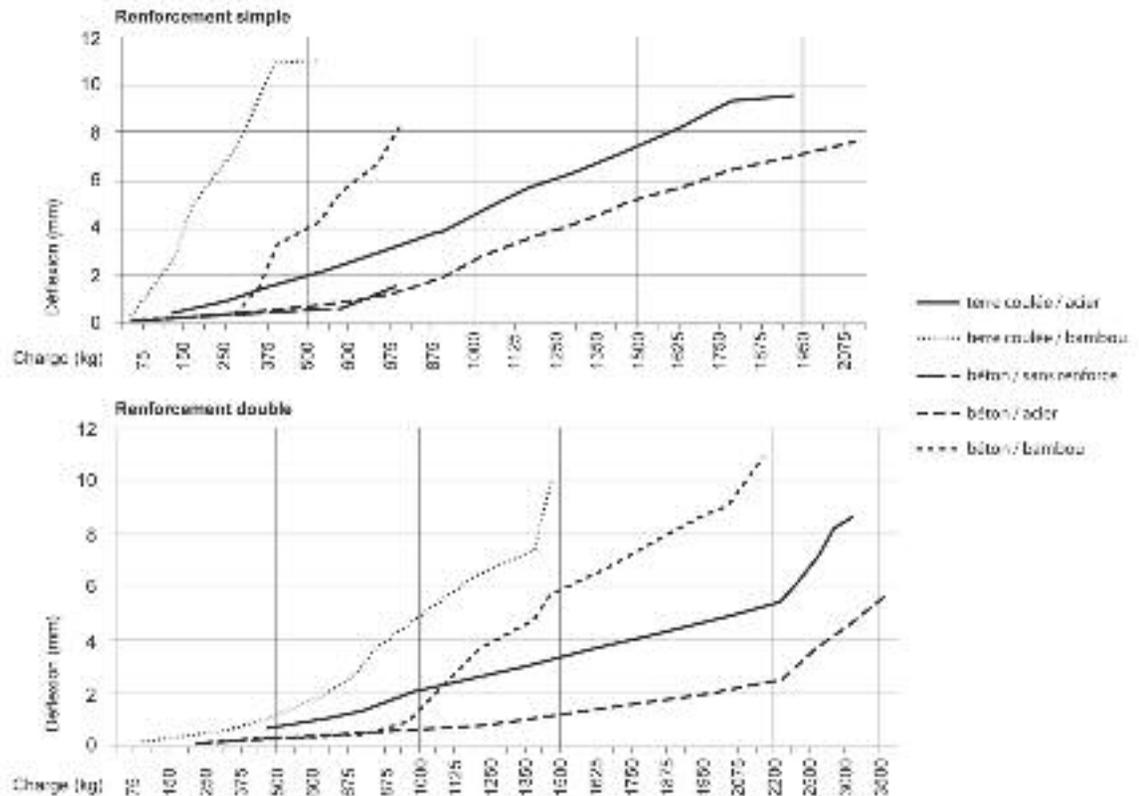


Fig. 143 Graphique qui montre le comportements à la flexion des poutres sous charges. Des échantillons représentatifs ont été sélectionnés pour construire ces graphiques. (Browne, 2013. p.37)

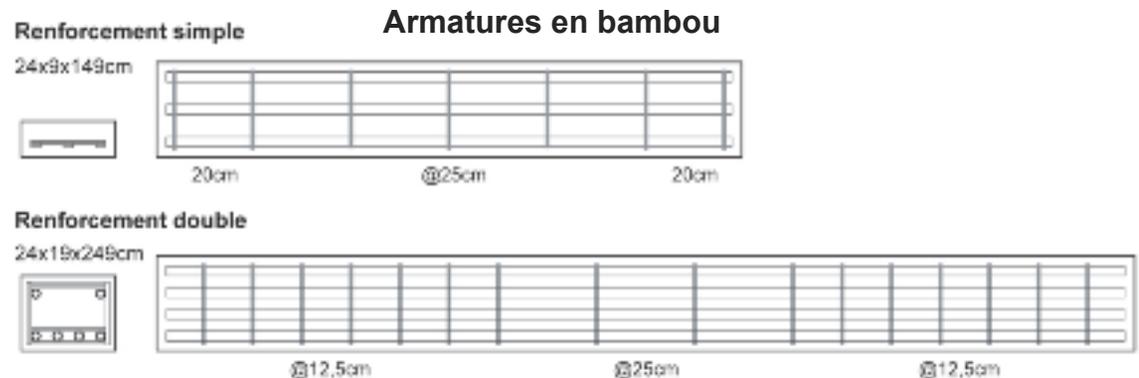


Fig. 144 Armatures en bambou. (Browne, 2013. p.35)

## RENFORCEMENT AVEC DES ARMATURES

Murs porteurs

**Architecte Michael FRERKING**  
**Arizona et Californie**  
**Terre coulée armée**

L'architecte Michael Frerking a construit 14 maisons de terre coulée en Arizona et en Californie, il a construit même à San Francisco. Toutes ces maisons sont construites en zone sismique, avec des critères "Net-Plus Homes" et LEED.

Il construit avec des murs de 40 centimètres d'épaisseur, qui ont un isolant thermique intégré. Comme renforcement il utilise une armature de tiges d'acier qui forme des échelles dans le sens transversal des murs et qui sont reliées entre elles par d'autres tiges horizontales.

Ses formules terre-sable-gravier sont fibrées. Comme stabilisant il utilise du ciment, des cendres volantes et de l'oxyde de magnésium. Les deux derniers permettent de réduire en 75% la quantité de ciment dans les formules. La résistance à la compression de ces formules varie entre 5.5 et 17 MPa. Il pense que l'utilisation des fibres dans la masse et l'utilisation des géogrilles pourraient se substituer au renforcement avec tiges d'acier.

Pour la mise en œuvre il se sert de la technologie du béton. Il utilise des coffrages de grand format et il pompe le mortier pour couler les murs.



Fig. 145 Vue d'armatures de tige d'acier et des plaques d'isolant thermique. (photo : Michael Frerking)



Fig. 146 Vue d'armatures de tige d'acier et des plaques d'isolant thermique. (photo : Michael Frerking)



Fig. 147 Coffrage en train d'être posé. (photo : Michael Frerking)



Fig. 148 Coulage des murs avec pompe. (photo : Michael Frerking)



Fig. 149 Mur fini (photo : Michael Frerking)



Fig. 150 Photo de la résidence "Tidwell" (photo : Michael Frerking)

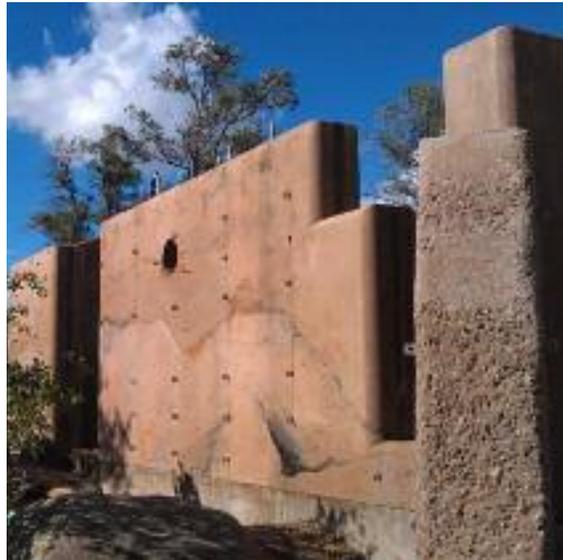


Fig. 151 Mur fini (photo : Michael Frerking)



Fig. 152 Mur fini (photo : Michael Frerking)

**La terre coulée armée**



## 4.1 Pistes de réflexion sur le renforcement parasismique

On peut armer la terre et construire parasismique en pisé, adobe, BTC, bauge, torchis, terre allégée. On peut armer la terre coulée également. Comme je l'ai signalé précédemment, l'architecte Michael Frerking construit des maisons parasismiques en terre coulée en Arizona et en Californie. On a vu la fiche de l'ingénieur Webster qui montre qu'on peut satisfaire la réglementation parasismique américaine pour construire en terre coulée si on la renforce avec une grille métallique. Dans l'annexe 1, j'expose d'une manière plus approfondie, que ce n'est pas le matériau, mais que c'est la manière dont les matériaux sont disposés entre eux, l'action conjointe de tous les éléments constructifs, la configuration et la conception d'une construction et de ses détails constructifs, et la qualité de la main d'œuvre, qui va donner à une structure un comportement dynamique adéquat face aux séismes. Suite aux constats présentés jusqu'ici il est possible d'affirmer qu'on peut construire parasismique en terre coulée. Néanmoins cette affirmation est imprégnée de nombreuses questions encore non résolues:

1. Comment doit-on concevoir une construction en terre coulée? Quelles sont les règles propres à la conception d'une construction en terre coulée?
2. Quel degré de sismicité peut-on

satisfaire avec des constructions en terre coulée armée?

3. Quels comportements dynamiques peut-on avoir avec des constructions en terre coulée armée?
4. Quel est le comportement dynamique des divers éléments constructifs en terre coulée armée?
5. Quels matériaux peut-on utiliser pour renforcer et armer la terre coulée?
6. Quels sont les types de renforcement et armatures qu'on peut utiliser dans la terre coulée?
7. Quelles sont les configurations possibles de renforcement et armatures?
8. Quelles résistances mécaniques peut-on atteindre avec la terre coulée armée?
9. Quelles résistances mécaniques peut-on atteindre avec la terre coulée doublement armée: avec une armature et avec des fibres dans la masse?
10. Quelle est la relation entre les différents matériaux de renforcement et les résistances mécaniques?
11. Quels comportements élastiques peuvent avoir divers éléments constructifs en terre coulée armée?
12. Quelle capacité de stockage d'énergie peuvent-ils avoir?
13. Quels types de ruptures peuvent-ils avoir?
14. Quelle dégradation de résistance et de la rigidité peuvent-ils subir sous charges cycliques répétées et alternées?
15. Dans quel facteur peut-on réduire l'élançement d'un mur avec des différents types d'armatures?

16. Quelle résistance à l'arrangement divers matériaux peuvent-ils attendre?

17. Quelle adhérence y a-t-il entre la terre coulée et chacun des différents matériaux pour renforcer la terre coulée?
18. Est-il possible qu'une armature soit ou devienne une partie intégrale de l'élément constructif de façon à interagir avec la terre dans la reprise des contraintes?
19. Y-a-t-il des matériaux qui s'intègrent mieux que d'autres?
20. L'acier montre-t-il dès après de corrosion à l'intérieur de la terre coulée? Comment change-t-il le facteur de corrosion entre une terre coulée sans ciment et autres avec des teneurs en ciment qui augmente?
21. Si on utilise de l'acier à béton dans la terre coulée doit-on le mettre à l'intérieur d'un tuyau ou on le place-t-on directement contact direct avec la terre coulée?
22. Si on utilise de l'acier à béton dans la terre coulée doit-on le peindre? Et comment change ce critère en fonction de la quantité de ciment?
23. Y-a-t-il un besoin de réduire la taille d'une banchée de terre coulée en fonction de l'augmentation du degré de sismicité?
24. Quel est le comportement dynamique d'une banchée en fonction de sa géométrie? Y a-t-il des géométries qui rend la terre coulée plus flexible et qui élargissent son domaine élastique?
25. Quels éléments constructifs peut-on concevoir en terre coulée armée?
26. Comment peut-elle la terre coulée armée s'intégrer avec d'autres systèmes

constructifs en terre?

27. Quels éléments constructifs en terre coulée armée pourraient être utilisés dans le pisé, dans l'adobe et autres techniques en terre?

28. Quelles sont les applications que la terre coulée armée peut avoir dans la construction contemporaine?

29. Quels sont les domaines constructifs où on pourrait utiliser la terre coulée armée?

30. Quels sont les besoins qu'on pourrait satisfaire avec la terre coulée armée?

31. Quels sont les éléments constructifs en béton conventionnel qu'on pourrait substituer avec la terre coulée armée? Et dans quelles circonstances pourrait-on faire cette substitution?

32. Quels sont les contextes où l'on pourrait utiliser la terre coulée armée?

33. Quel est l'intérêt social de la terre coulée armée?

34. Quels sont les limites de l'utilisation de la terre coulée armée?

À l'état actuel de ma réflexion, je ne peux avoir que des réponses sommaires et vagues à ces quelques questions. Je ne peux avoir que des réponses qui sont en soit des questions à résoudre et à vérifier. Je ne peux avoir que des pistes pour concevoir des systèmes constructifs parasismiques en terre coulée armée. Si on arrive à satisfaire des critères parasismiques, on trouverait les réponses pour satisfaire des circonstances moins exigeantes.

D'une manière générale, la conception d'un système constructif parasismique en terre coulée armée impliquerait de prendre en compte les variables suivantes:

Le degré de sismicité de l'endroit à construire.

La taille de banchée à couler, le type et les dimensions de coffrage à utiliser.

Le type d'armature ou renforcement à utiliser.

La quantité de renforcement nécessaire.

L'emplacement de l'armature dans l'élément constructif.

La formule à utiliser et ses caractéristiques.

L'utilisation ou non de fibres dans la masse.

La consistance de la formule et la mise en œuvre désirées.

Le retrait volumétrique et le coefficient de dilatation du matériau, qui sont en relation avec le type d'armature à utiliser, des retraits trop importants sont incompatibles avec certains types d'armatures.

Ces variables seraient utilisés pour développer un ou plusieurs systèmes constructifs propres au lieu de la construction. Cette attachement au lieu est principalement du à la terre qu'on utilise et en second plan, aux matériaux d'armatures utilisés dans le cas de matériaux naturels. La terre coulée continue à être comme les autres techniques de construction en terre, une technique qui utilise les matériaux locaux.

Le retrait volumétrique et le coefficient de dilatation déterminent les dimensions d'une

banchée. Un rétrécissement réduit permet de faire des pièces de plus grande taille. Apparemment il peut exister une relation entre le degré de sismicité et la taille d'une banchée convenable. La terre coulée non fibrée reste un matériau de rupture fragile. Si on a une banchée de grand format, pendant les séismes, les fissures due aux contraintes de traction peuvent se propager dans la pièce plus facilement. Plus grande est la pièce, plus fragile elle devient face au mouvements, et plus grandes seront les fissures. On a donc l'hypothèse suivante: plus la sismicité est élevée plus petite doit être la taille des banchées. Sous cette hypothèse il y aurait donc des tailles de banchées adéquates ou optimales pour chaque degré de sismicité (fig.161). Cette hypothèse semble valable pour des formulations non fibrées et sans ciment. Elle peut commencer à devenir moins vraie pour des formules fibrées et selon l'augmentation de la teneur. En tout cas, le pisé stabilisé passe la réglementation parasismique américaine pour un zone de sismicité 4, où normalement des coffrages intégraux sont utilisés, donc des banchées de grand format construites. On ne connaît pas non plus l'influence des différents types d'armatures dans la propagation des fissures. On peut néanmoins présumer que dans le cas des renforcements horizontaux les fissures s'arrêteraient précisément dans les renforcement.

En relation à la question : « comment concevoir des constructions en terre coulée armée ? ». Les deux facteurs qui prennent plus d'importance seraient la teneur en ciment (ou autres stabilisants physico-chimiques) et le type d'armature ou renforcement utilisé. Pour les formules non stabilisées la conception architectural et constructive se rapprocheraient de celle du pisé. On suivrait plutôt les règles de conception utilisées pour le pisé et la bauge. Au fur et à mesure que la teneur en ciment augmente et la quantité des renforcement et résistance des matériaux de renforcement augmente, la conception commencerait à ressembler à celle du béton, sans y arriver complètement les critères de conception des constructions en terre. Ceci dit, il pourrait y avoir de nouveaux systèmes constructifs avec des logiques propres de conceptions.

La **fig. 159** montre d'une manière indicative la relation entre les variables mentionnées et le degré de sismicité. Avec ce terme je représente une augmentation progressive du risque sismique. Je ne fait pas référence à une échelle de magnitude ou d'intensité quelconque. Une amélioration progressive du comportement dynamique et une augmentation des résistances mécaniques des systèmes constructifs utilisés, est nécessaires quand le degré de sismicité augmente.

Si le degré de sismicité augmente, la tendance serait que: la résistance du matériau utilisé, la nécessité de

renforcement, la résistance des matériaux de renforcement et la teneur en fibre dans la masse augmentent également. Cependant il est tout à fait possible de construire dans un zone de haute sismicité avec des formules sans ciment et avec des matériaux de renforcement naturel comme des roseaux, bambou et bois qui restent moins résistant que l'acier par exemple. Dans le même tableau, on voit que quand le degré de sismicité augmente, la distance entre les éléments de renforcement et l'armature et le format de banchées diminue.

## 4.2 Low tech et High tech

La terre coulée est une technique très flexible. Elle ouvre la possibilité de développer une grande variété d'éléments et de systèmes constructifs. Ils peuvent se développer dans deux pôles différents et avec des combinaisons entre eux. Chaque pôle correspond à deux contextes différents.

Un pôle serait en Low tech, où on a développé des systèmes constructifs avec des formules sans ciment ou autres stabilisants physico-chimiques industriels, mais avec une utilisation possible de substances naturelles, comme le jus de cactus par exemple. Les formules utiliseraient des terres reformulées: une terre à laquelle on ajoute du sable ou gravier, où la combinaison de deux terres différentes. Deux types de formulation pourraient coexister: un travail très poussé de formulation, avec un granulométrie bien optimisée; et des formulations courtes avec des essais de terrain simples. Les formules peuvent être fibrées ou non, si cela est

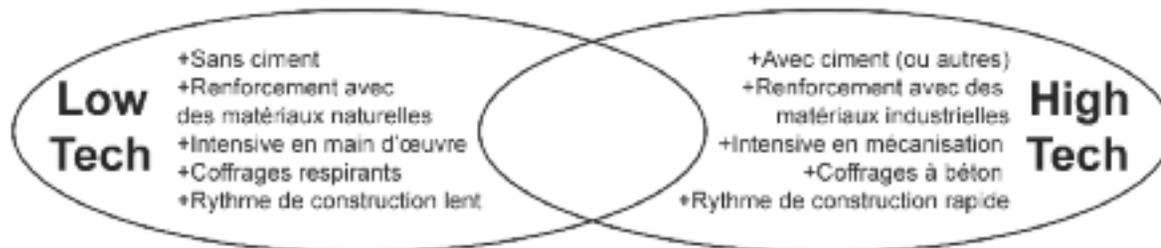


Fig. 154 Deux champs de développement des systèmes constructifs en terre coulée: le pôle low tech et le pôle high tech.

nécessaire. On préférerait renforcer les éléments avec des matériaux naturels. Ces systèmes constructifs seraient intensifs en main d'œuvre, faites complètement à la main ou à l'aide de machines simples comme une bétonnière. Le rythme de construction serait lent et on pourrait attendre le temps nécessaire pour le séchage des éléments constructifs.

Le deuxième pôle serait en High tech. On utiliserait surtout des formules qui ont du ciment ou autres stabilisants. Les formules seraient très travaillées avec des granulométries très bien optimisées ; on se permettrait d'utiliser des dispersants. On utiliserait des matériaux industriels pour le renforcement. De nouveaux types d'armatures seraient développés et produits. On utiliserait des coffrages à béton et on pourrait décoffrer en quelques jours. Le rythme de construction pourrait être rapide compte tenu de l'usage intensif des machines.

Il pourrait y avoir des combinaisons entre les deux, par exemple un système constructif armé d'un treillis 3D en fibres naturelles, qui serait spécialement conçu pour supporter les efforts horizontaux. Le treillis aiderait aussi à réduire l'épaisseur de murs. Le système constructif utiliserait une formule sans ciment, avec des biopolymères comme stabilisant, et serait armé avec des fibres naturelles. La formule serait très bien optimisée et les biopolymères employés permettraient de décoffrer en quelques jours.

## 4.3 Typologies de renforcement pour la terre coulée

La terre coulée offre la possibilité d'intégrer dans les éléments constructifs de nouvelles typologies d'armatures qui ne sont pas possible à utiliser avec d'autres techniques de construction en terre.

Dans la terre coulée on pourrait utiliser des typologies déjà décrites dans le chapitre 5:

- Renforcement vertical
- Renforcement horizontal
- Renforcement avec des grilles
- Renforcement avec armatures

Les nouvelles typologies seraient:

- Renforcement diagonal
- Renforcement avec des textiles
- Treillis 3D

La fig. 162 montre de dessins de ces typologies. Pour une facile identification, un couleur est assigné à chaque typologie. Les mêmes couleurs se répètent dans les tableaux des pages suivantes.

Les matériaux susceptibles d'être utilisés comme renforcement de la terre coulée seraient :

- Roseaux
- Bambou
- Bois
- Textile : toile en fibre de jute, toile en fibre

- de verre, etc.
- Géogrille
- Acier

Les autres matériaux à explorer seraient :

- Câbles d'acier
- Cordes de fibres naturelles
- Cordes synthétiques
- Certains tubes en plastique

La fig. 163 et 164 montre quelles seraient les typologies que l'on pourrait réaliser avec chaque matériaux. Une même typologie peut être réalisée en plusieurs matériaux.

Dans le page 79-81, je présente trois tableaux qui arrangeraient les typologies de renforcement en fonction : du degré de sismicité du lieu à construire du matériau de renforcement et de sa résistance à la traction des résistances mécaniques de la formule de terre coulée utilisée de la quantité de ciment (ou autre stabilisant)

Les deux premiers tableaux combinerait différentes typologies faites de divers matériaux. Le troisième tableau arrangerait les typologies en fonction d'un seul matériau : l'acier. Il faut remarquer que ces tableaux sont en soit une hypothèse des performances que les typologies présentées arriveraient à atteindre avec une typologie, un matériau de renforcement et une formule de terre coulée spécifiques.

La façon de lire et d'interpréter les tableaux est la suivante. La première ligne représente des formules de terre coulée qui n'utilisent pas de ciment. Au fur et à mesure que les lignes descendent, l'augmentation de ciment (ou autres stabilisants) est progressive. La quantité de ciment désirée, serait la plus minime possible pour atteindre la résistance requise. Un dosage au dessous de 6% serait idéale. Comme il a déjà été exposé, la quantité de ciment à granulométrie égale est directement proportionnelle aux résistances mécaniques. On considère entre 6 et 10% en volume, la quantité de ciment nécessaire pour faire du sol-ciment. Le béton conventionnel de ciment a un dosage en volume d'entre 14% et 30% selon la résistance recherchée.

Les fonds d'images ont des couleurs. Chaque couleur représente une typologie de renforcement. Les lignes représentent des matériaux différents. Toutes les typologies enfermées dans une ligne d'une même couleur, indiquent qu'elles peuvent être réalisées dans ce même matériaux. Il y a des typologies qui peuvent se réaliser en plusieurs matériaux. Il y a une relation entre la résistance de la formule et la typologie de renforcement utilisée. Toutes les typologies ne sont pas adéquates à tous les types de formules. Les typologies qui ont une quantité supérieure d'acier conviennent avec des formules qui sont plus résistantes et qui ont un rétrécissement minimal. Une formule sans ciment avec très peu de rétrécissement pourrait convenir pour

certaines typologies en acier. Il y a aussi des typologies qui conviennent avec des formules fibrées. Il y a des typologies qui peuvent être compatibles avec des formules de terre coulée à résistances différents.

Dans les pages 82-89, je montre les dessins des typologies dans une échelle plus grande et j'indique pour chaque dessin les matériaux et les caractéristiques générales des formules à utiliser. Par exemple, dans le tableau 1, page 79, et à plus grande échelle dans la page 82. On peut apprécier dans la première ligne une série de typologie de renforcement horizontal en bois. On utiliserait dans ce cas des formules sans ciment. Au fur et à mesure que la sismicité augmenterait, la quantité de renforcement horizontal augmenterait aussi. Dans l'image "D" on peut apprécier qu'en plus de renforcement horizontal, pour répondre à un sismicité qui augmente, on pourrait aussi faire des banchées plus petites entre les lits de renforcement. Retournons au tableau 1. La dernière image de la première ligne est une typologie verticale en acier. Le placement de cette typologie avec une formule sans ciment est inspirée du règlement de construction en terre de Nouvelle Zélande, qui autorise ce type de renforcement pour des constructions en pisé et en adobe. Dans la deuxième ligne on voit en premier deux typologies diagonales en bois. Ensuite on trouve des typologies en textile, qui pourraient être de la toile de fibre de jute par exemple. Par la suite on apprécie deux

typologie de renforcement avec grille en matériaux plastique, (géogrilles). Dans la troisième ligne on voit des typologies horizontales en textile de fibre de verre par exemple, et en géogrille. Après on trouve diverses typologies en bambou. Pour ces typologies on utiliseraient des formules avec de teneurs en ciment plus importantes et avec des fibres dans la masse. En fin on apprécie une série de typologies en acier. On voit que la typologie verticale et une typologie horizontale se répètent. Le fait d'avoir une même typologie horizontale par exemple avec une formule plus résistante et avec des renforcements en béton armé, donnerait des possibilités constructives différentes et plus performantes.

Les typologies de renforcement avec grilles, de la dernière ligne du tableau 1, utiliseraient des formules plus chargées en ciment (ou autre stabilisant). La conception des systèmes constructifs avec ce type de renforcement et ce type de formules serait plus proche d'une conception pour les constructions en béton conventionnel, sans perdre bien sûr tout à fait les caractéristiques propres de la conception de construction en terre.

Dans ce tableau les deux pôles opposés sont la première et la dernière image. La première typologie serait construite dans un endroit de très faible sismicité, avec une formule sans ciment et renforcée avec des matériaux naturels, donc avec une plus grande quantité d'utilisation des matériaux locaux. La dernière image, construite dans une zone de forte sismicité, renforcée en

acier avec une formule chargée en ciment. On continuerait à utiliser des matériaux locaux mais l'utilisation des matériaux industriels augmente. Ces deux images opposées répondraient aux contextes différents.

Le deuxième tableau est une autre manière d'arranger les typologies. On voit apparaître un nouveau matériau : les fibres naturelles. Des treillis 3D et des grilles pourraient être développées spécialement pour la terre coulée non stabilisée.

Le deuxième bloc des typologies en acier pourrait utiliser des formules fibrées sans ciment sous réserve que le rétrécissement le permette. On apprécie par la suite un bloc de typologies en bambou et en acier.

### Exemple 1 : imaginaire des dessins

Ces quatre images ont le propos d'illustrer l'imaginaire qui peut exister derrière chaque dessin. On part du dessin à deux photos d'un muret de terre coulée que j'ai réalisé, la première photo montre le renforcement avec des géogrilles et la deuxième photo montre le muret fini. Les détails de ce muret sont traités dans la section 4.4 de ce chapitre. Le dernier dessin, à titre d'exemple, montre une possible configuration d'une maison construite avec ce type de système constructif.

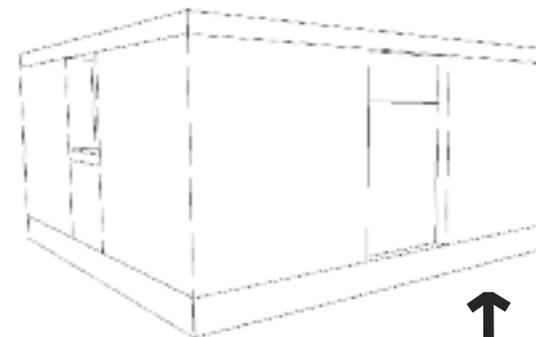


Fig. 158 Dessin du possible configuration de ce système constructif.

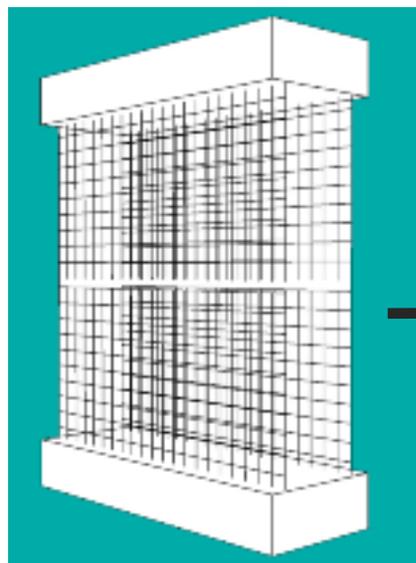


Fig. 155 Typologie de renforcement avec grille.



Fig. 156 Photo de renforcement avec grille pour muret en terre coulée.



Fig. 157 Photo de muret en terre coulée avec poutres en béton.

# Degré de sismicité



Fig. 159 Ce tableau montre d'un manière indicative la relation entre les variables pour la conception d'un système constructif parasismique en terre coulée armée et le degré de sismicité.

Les trois tableaux suivants montrent des données des divers matériaux sur la quantité de ciment par mètre cube, résistance à la traction et à la compression. Ces données sont un repaire dans la lecture de la fig. 160

#### Quantité de ciment par metre cube

Pisé	0%	0kg
Terre coulée Brézins	3%	45,3kg
Terre coulée AC100	4,5%	93kg
Pisé stabilisé	6%	118kg
Terre coulée 1CyR3	7,5%	157kg
Terre coulée AC100	7,7%	159kg
Pisé stabilisé	8%	157kg
CEMATERRE	10%	151kg
Pisé stabilisé	10%	226kg
Béton f'c 100	14%	175kg
Béton f'c 150	20%	280kg
Béton f'c 200	25%	350kg
Béton f'c 250	30%	420kg

Fig. 160 La colonne du milieu indique le pourcentage volumique de ciment par mètre cube, sauf pour Terre coulée AC100 et Cy1R3 qui est en pourcentage massique. La chiffre de la masse volumique du ciment utilise pour ces calcules est de 1,51 kg / lt (Barros, Imhoff, 2010) (Serghini, 2013) (Browne, 2014) (Joris, 2011) (Zacek, 1996)

#### Taille de banchées et degré de sismicité

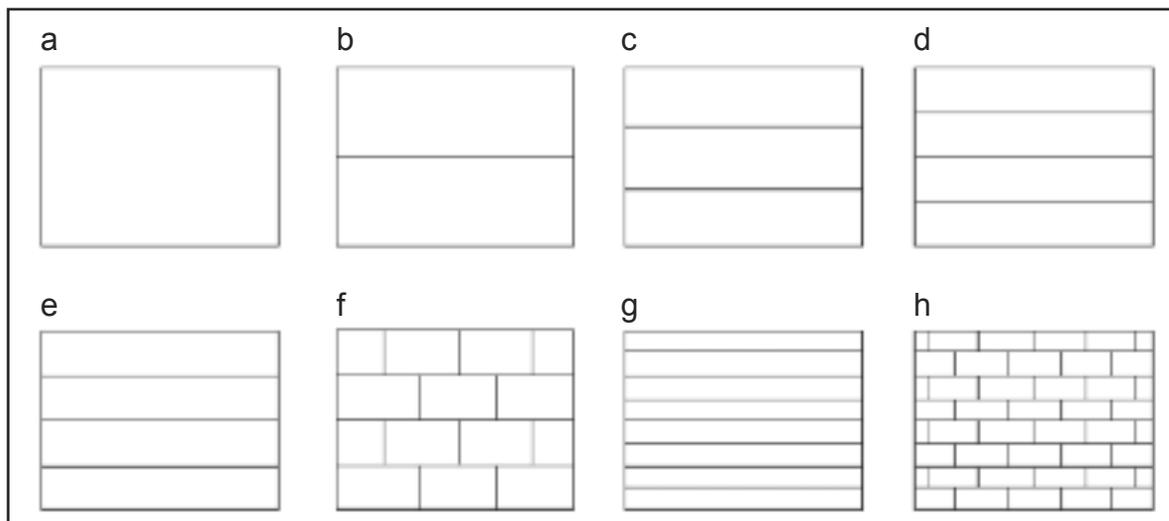


Fig. 161 L'image "a" représente une banchée grand format adéquate dans une zone de faible sismicité. La taille de banchée se réduit progressivement selon le degré de sismicité augmente. L'image "h", représente un mur construit dans une zone de forte sismicité, avec des banchées de format réduit, peut être de l'ordre de la tailles des «adobón», 30 cm de hauteur et 90 cm de largeur dans quelques endroits.

#### Résistance à la traction

Pisé	0,11-0,28MPa
Béton conventionnel	1,9MPa
Terre coulée AC100	0,62MPa
Géogrille	0.6-0.9MPa
Bois	60-80MPa
Chêne	90MPa
Pin	100MPa
Bambou	240MPa
Acier	412MPa

#### Résistance à la compression

Pisé	0%	0,3-3MPa
Pisé stabilisé	6%	4MPa
Pisé stabilisé	8%	4,7MPa
Pisé stabilisé	10%	5,5MPa
Terre coulée Brézins	3%	3,1MPa
CEMATERRE	10%	3-6MPa
Terre coulée AC100	4,5%	7,45MPa
Terre coulée 1CyR3	7,5%	11MPa
Béton conventionnel	20%	24MPa

## Typologie de renforcement pour murs en terre coulee

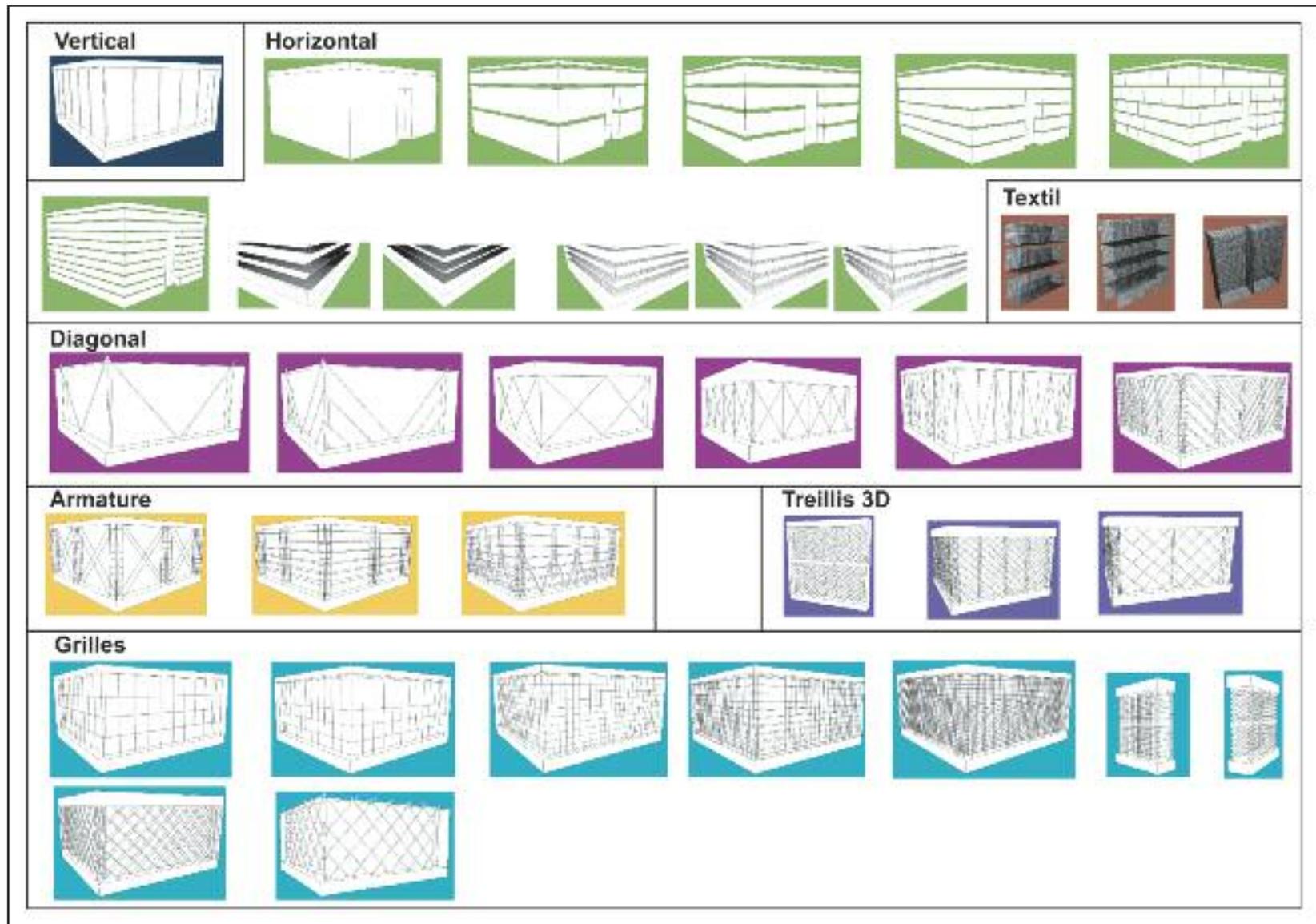
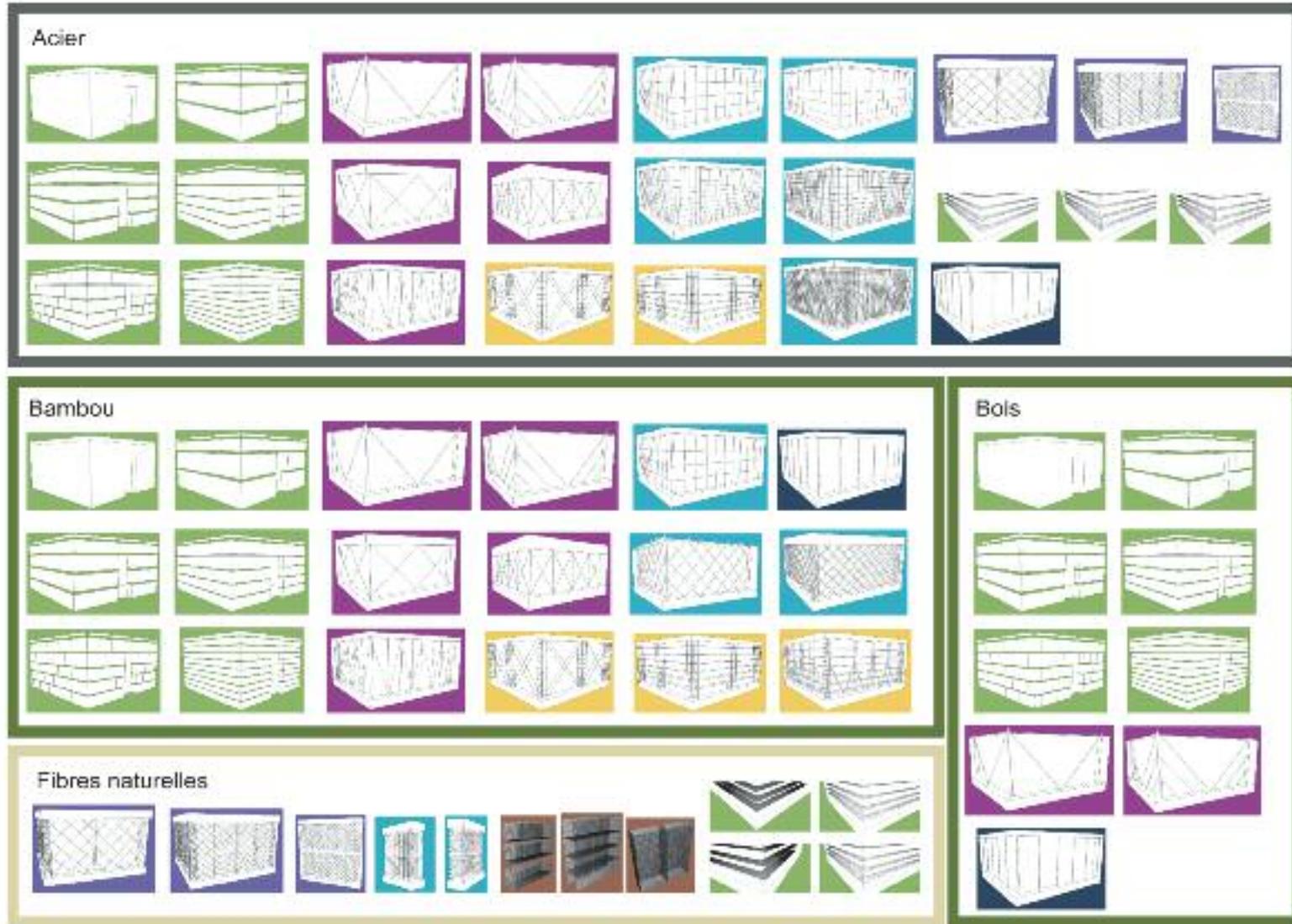


Fig. 162

Vertical
  Horizontal
  Textile
  Diagonal
  Armature
  Treillis 3D
  Grilles

## Matériaux pour les typologies de renforcement 1/2



- |          |            |         |          |           |             |         |
|----------|------------|---------|----------|-----------|-------------|---------|
| Vertical | Horizontal | Textile | Diagonal | Armature  | Treillis 3D | Grilles |
| Acier    |            | Bambou  | Textile  | Géogrille | Bois        |         |

Fig. 163

## Matériaux pour les typologies de renforcement 2/2

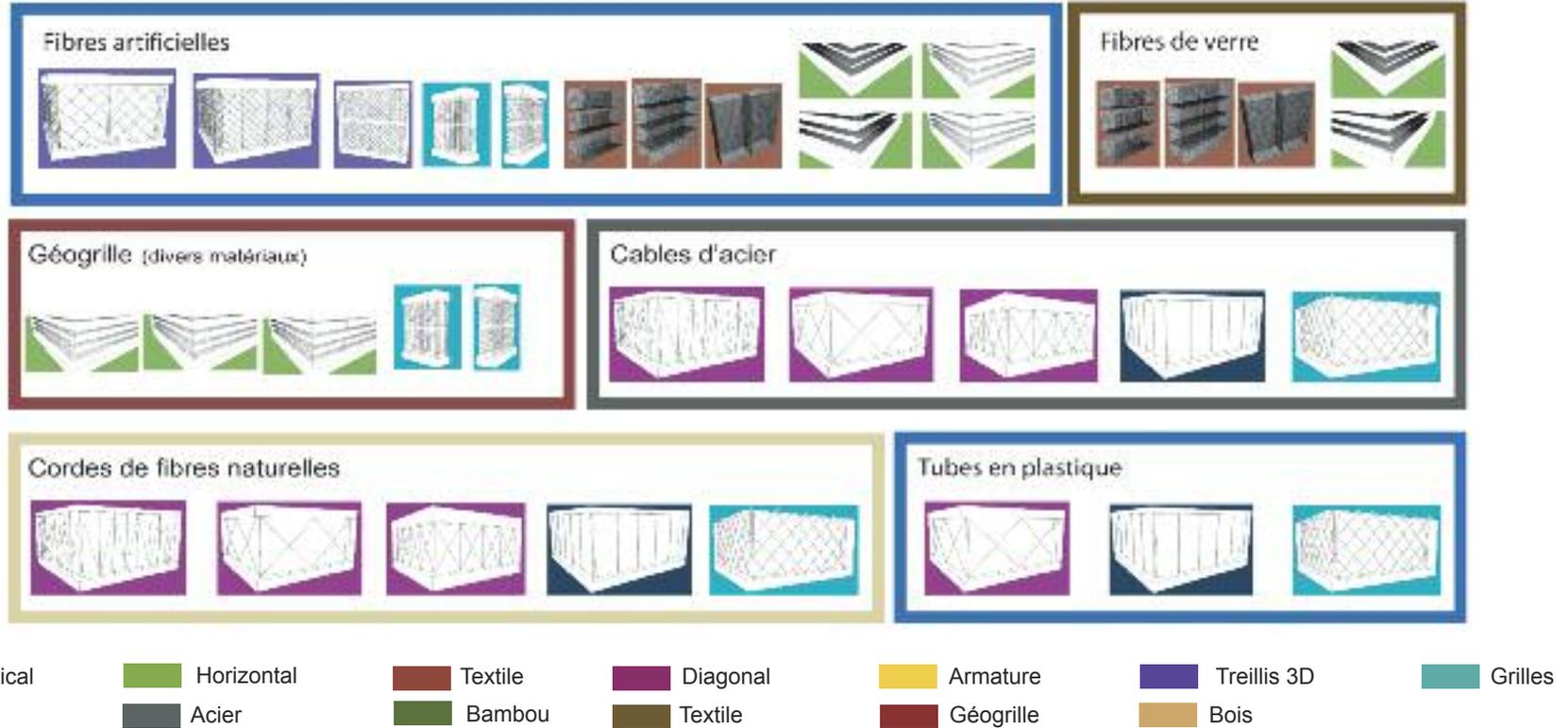
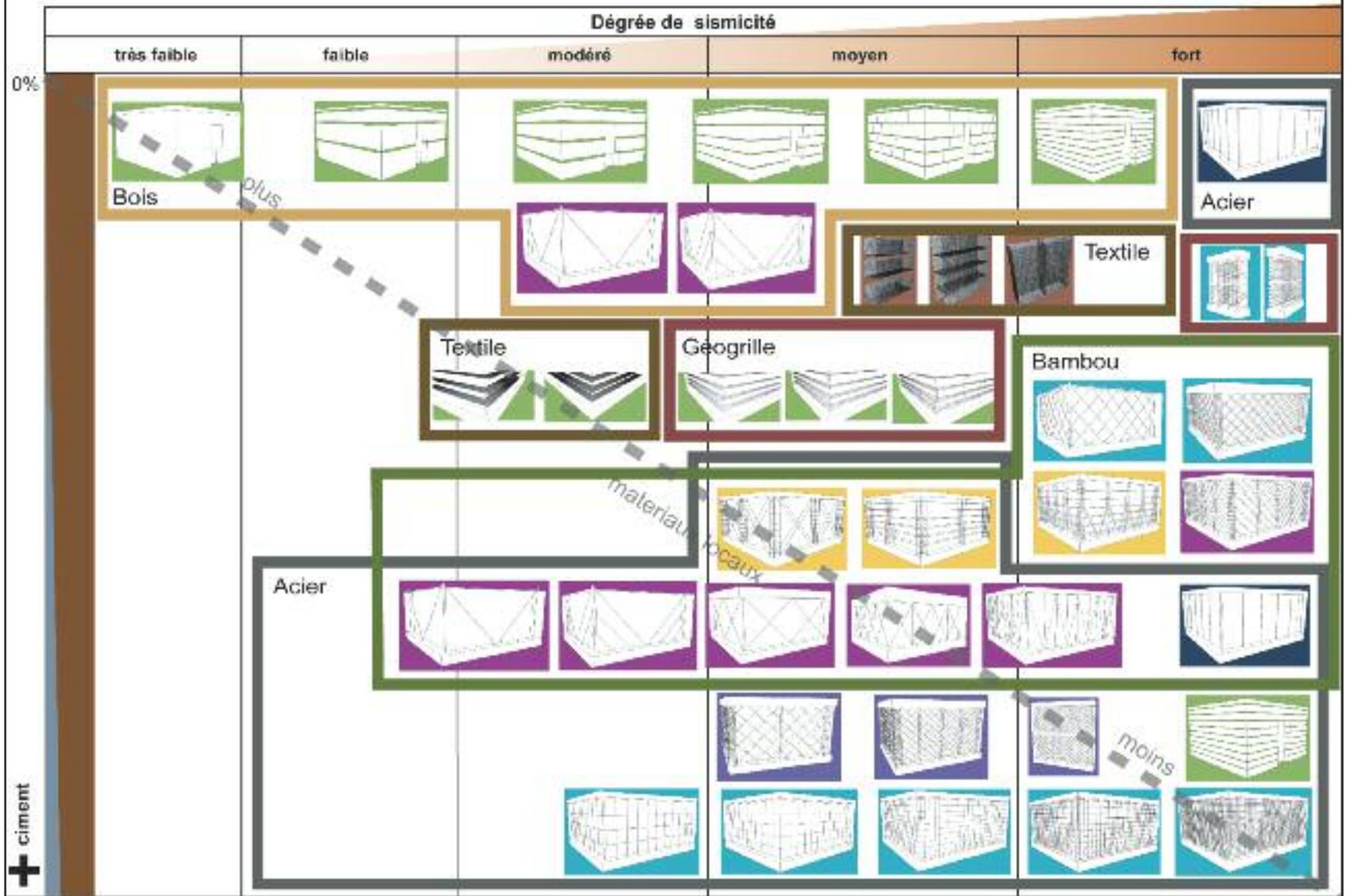


Fig. 164

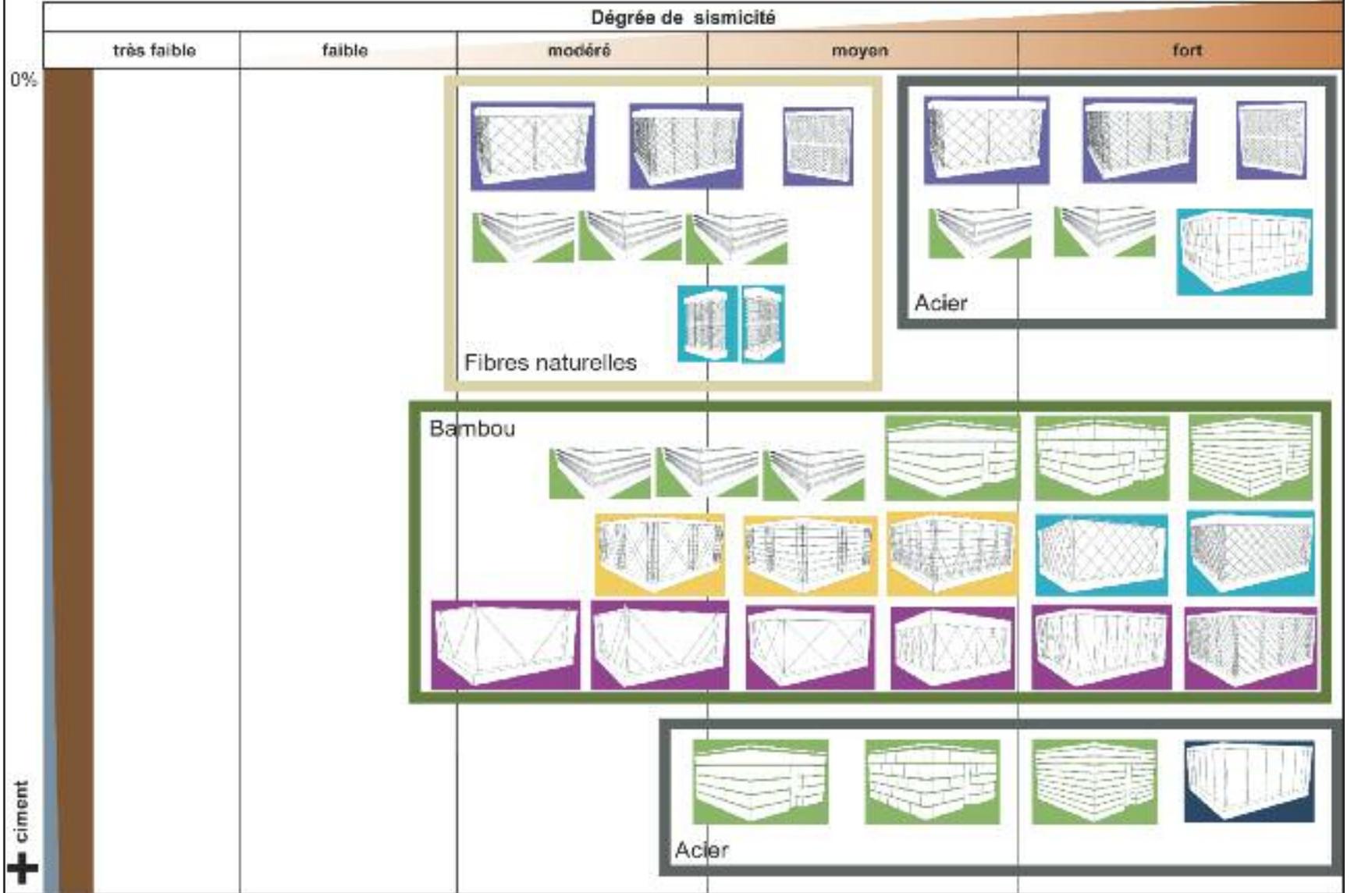
# 1 Tableaux de de performance : typologie-matériau-formule



- Vertical
- Horizontal
- Textile
- Diagonal
- Armature
- Treillis 3D
- Grilles
- Acier
- Bambou
- Textile
- Géogrille
- Bois

Fig. 165

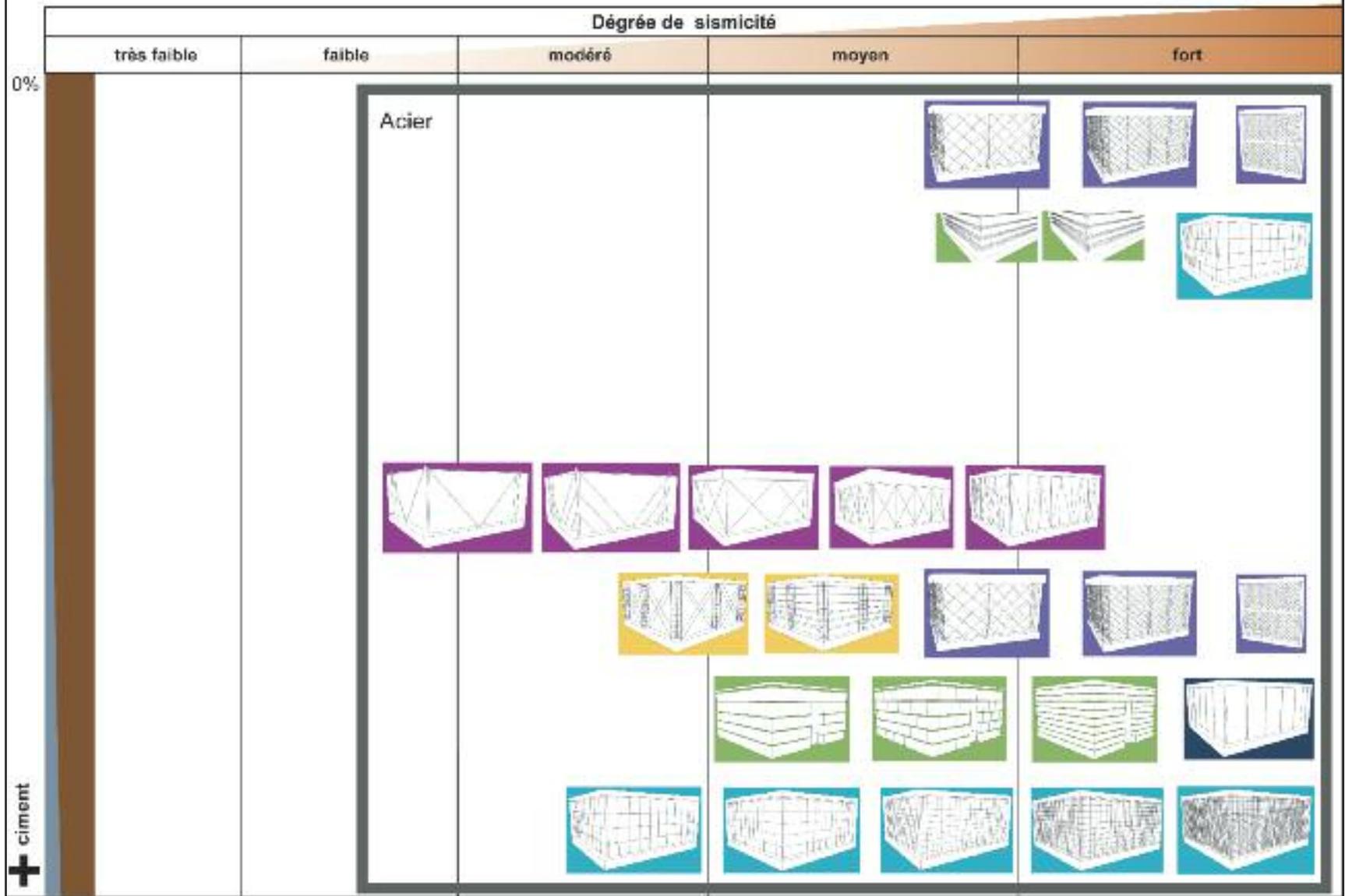
## 2 Tableaux de de performance : typologie-matériau-formule



- Vertical
- Horizontal
- Textil
- Diagonal
- Armature
- Treillis 3D
- Grilles
- Acier
- Bambou
- Textile
- Géogrille
- Bois

Fig. 166

### 3 Tableau de de performance : typologie-matériau-formule



- Vertical
- Horizontal
- Textil
- Diagonal
- Armature
- Treillis 3D
- Grilles
- Acier
- Bambou
- Textile
- Géogrille
- Bois

Fig. 167

## RENFORCEMENT HORIZONTAL

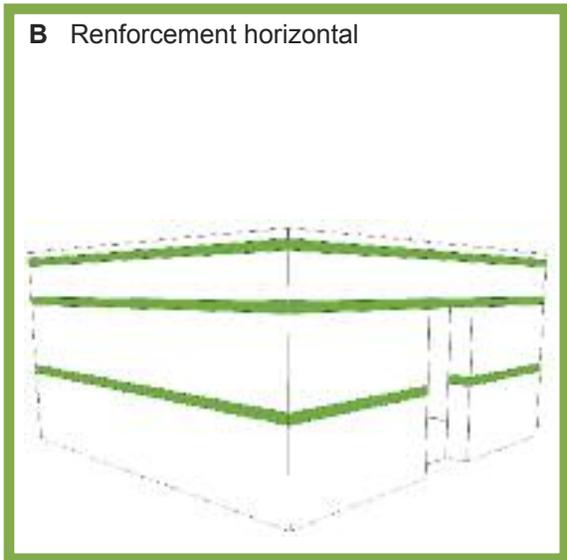


Fig. 168 Explication page 72.

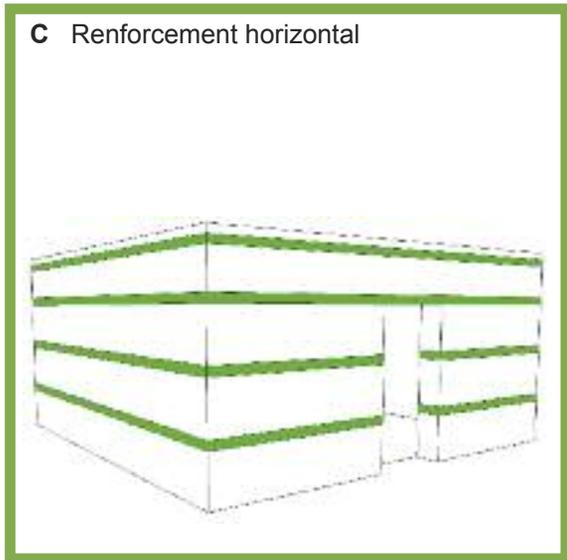


Fig. 169 Explication page 72.

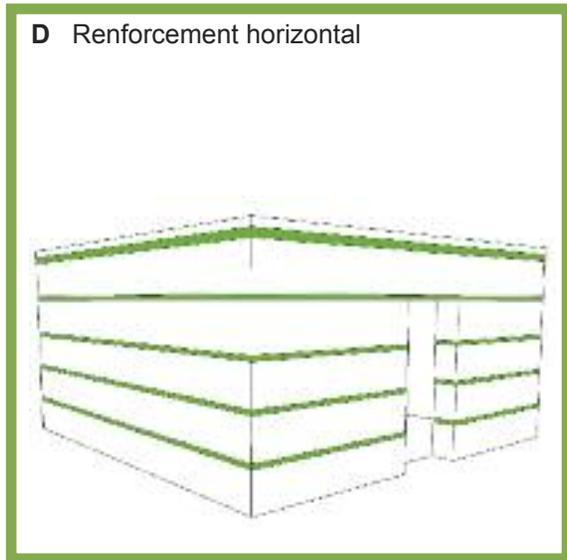


Fig. 170 Explication page 72.

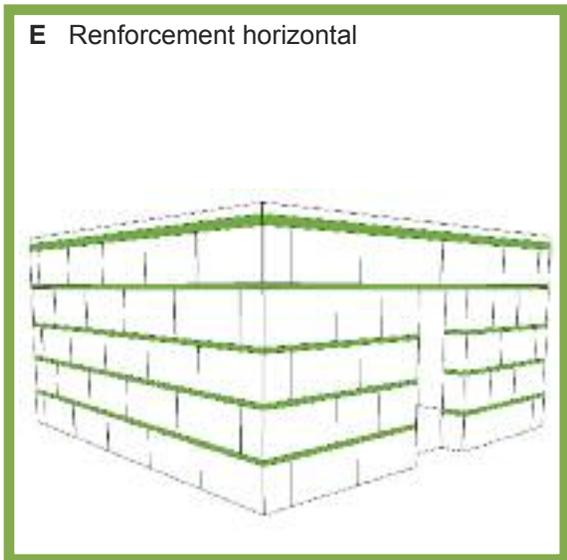


Fig. 171 Explication page 72.

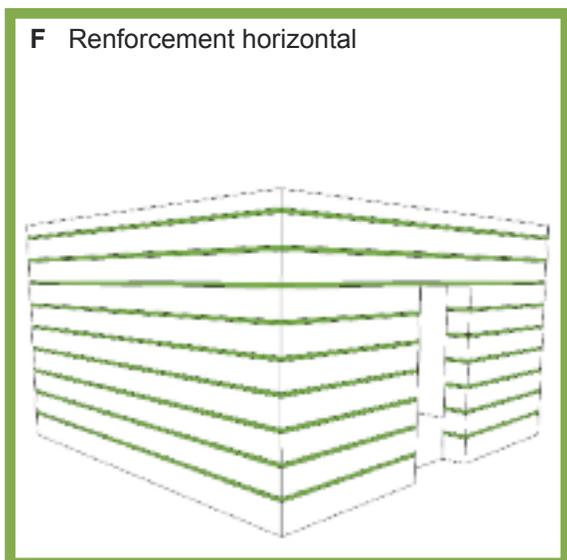


Fig. 172 Explication page 72.

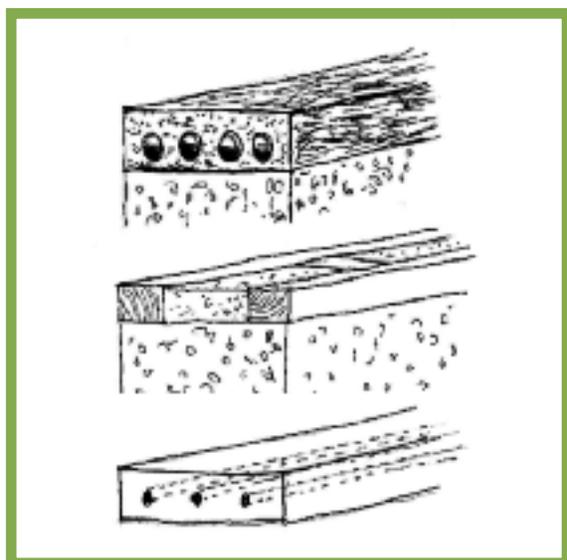


Fig. 173 Trois façons de faire les renforcements : en roseaux ou bambou entouré du mortier très fibré (idée de Wilfredo Carazas), en bois ou en béton.

## RENFORCEMENT HORIZONTAL



Fig. 174 Des toiles treillis en fibre de verre ou en fibre de jute ou une autre fibre naturelle pourraient s'utiliser comme renforcement horizontaux.

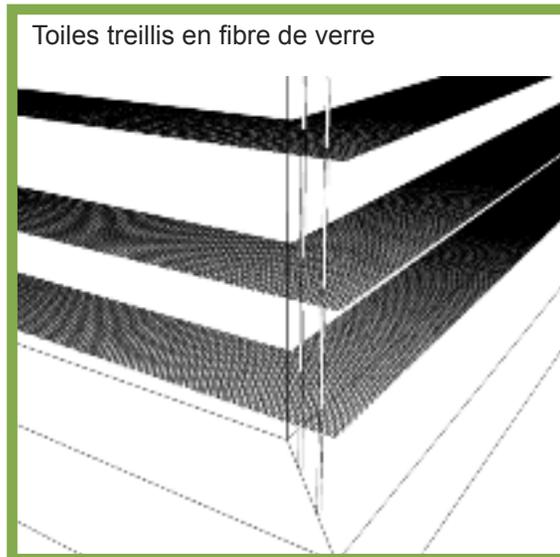


Fig. 175 Des barres verticales pourraient être utilisé pour renforcer plus les murs.

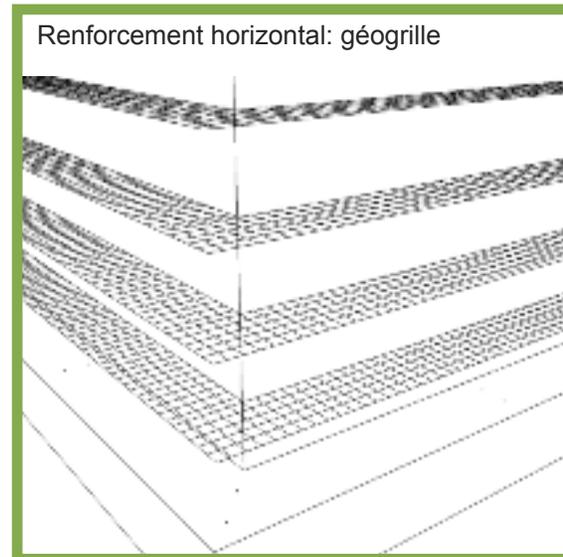


Fig. 176 Matériaux : acier, bambou, géogrid en plastique et en fibres naturelles. Les lits de renforcement horizontal reprennent les efforts.

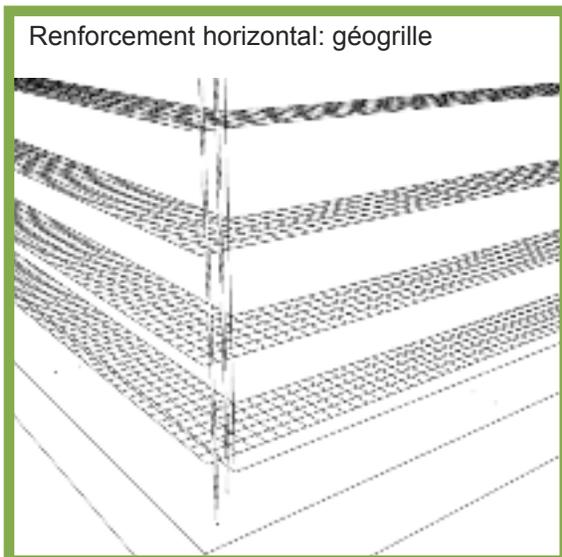


Fig. 177 Des barres verticales pourraient être utilisées pour renforcer plus les murs.

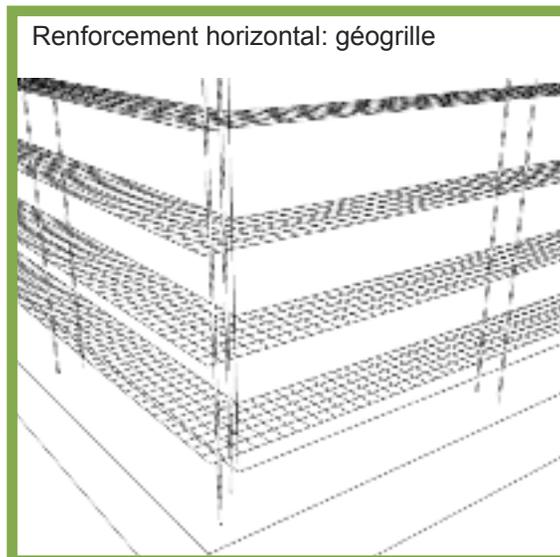


Fig. 178 Des barres verticales pourraient être utilisées pour renforcer plus les murs.

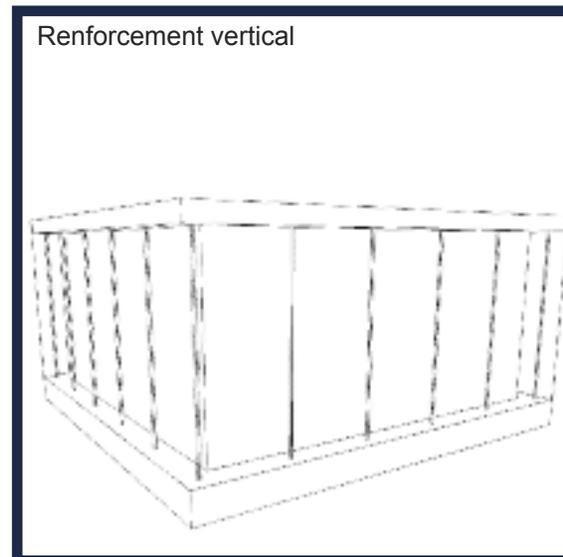


Fig. 179 Aux États Unit, en Australie et en Nouvelle Zélande sont utilisés des barres d'acier. On pourrait utiliser également : acier, bambou, bois, câbles d'acier, cordes des fibres naturelles.

## RENFORCEMENT AVEC DES GRILLES

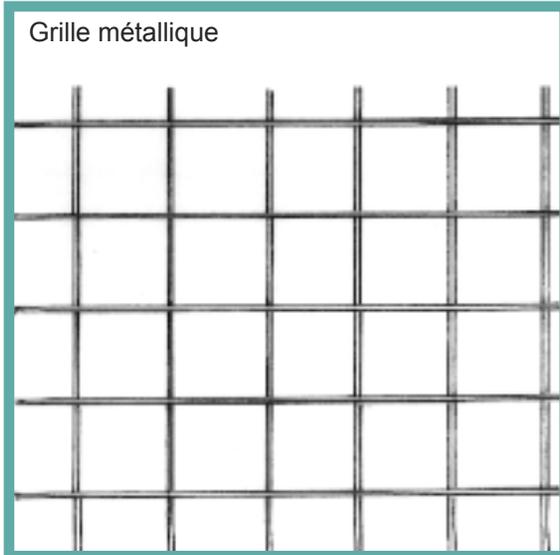


Fig. 180 Frederick A. Webster a démontré analytiquement qu'on pouvait satisfaire la réglementation américaine pour zone 4 avec une grille métallique, 56p.

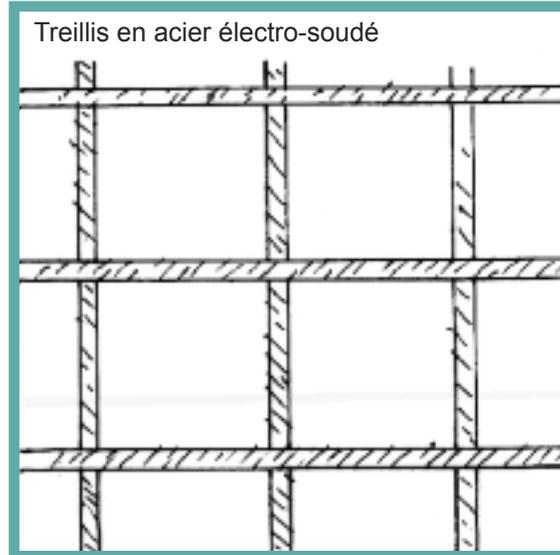


Fig. 181 Les treillis en acier électro-soudé sont utilisés au Chili comme renforcement des constructions en adobe existantes.

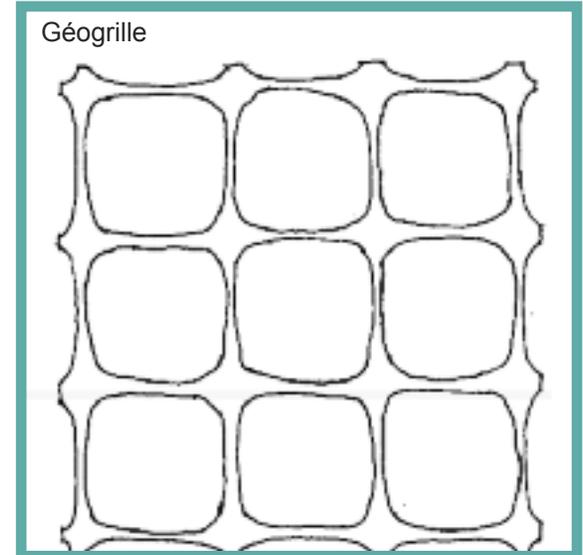


Fig. 182 Des géogrilles des deux cotes du murs sont utilisés au Pérou comme renforcement des constructions en adobe.

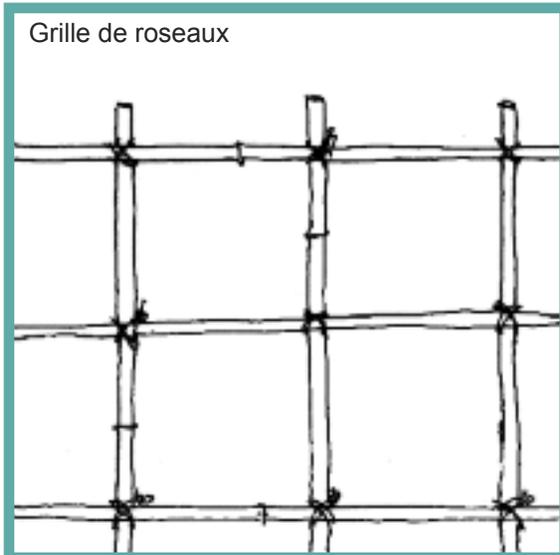


Fig. 183 L'utilisation des grilles en roseaux comme renforcement pourrait être tout à fait envisageable.

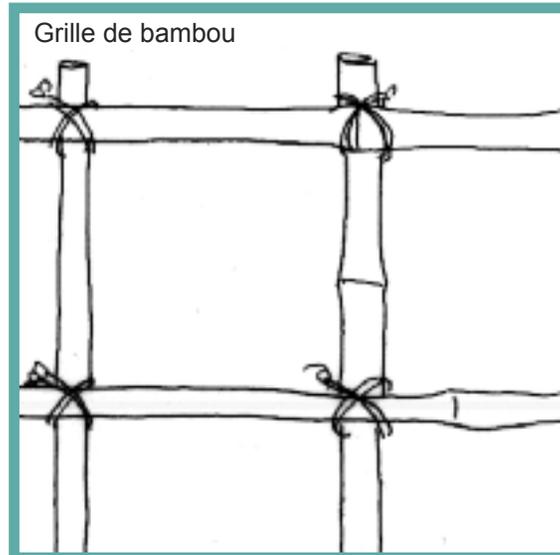


Fig. 184 L'utilisation des grilles en bambou serait aussi possible.

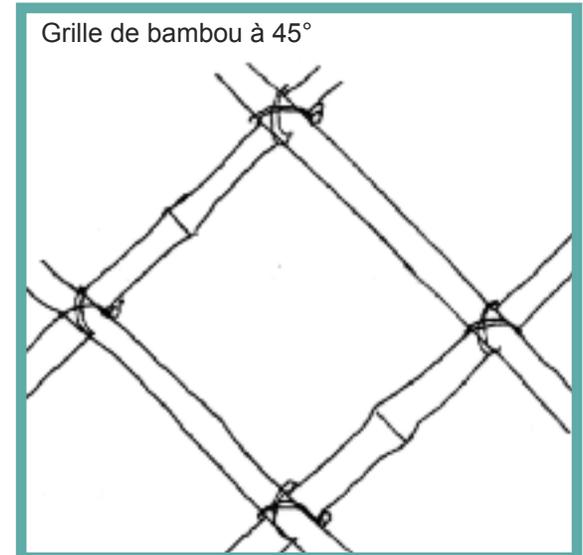


Fig. 185 Une grille à 45° travaille structurellement mieux face au forces horizontales.

## RENFORCEMENT AVEC DES GRILLES

Double coche de treillis soudé

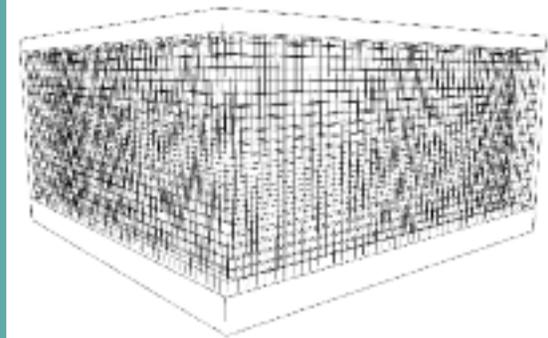


Fig. 186 Des treillis électro-soudé existants en double couche près des faces du mur pourraient être utilisées comme renforcement.

Double coche de treillis soudé

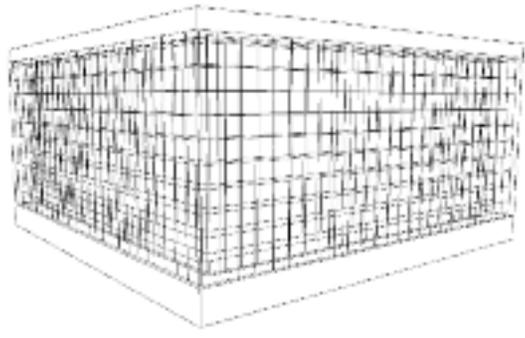


Fig. 187 Des treillis électro-soudé existants en double couche près des faces du mur pourraient être utilisés comme renforcement.

Coche simple de treillis soudé

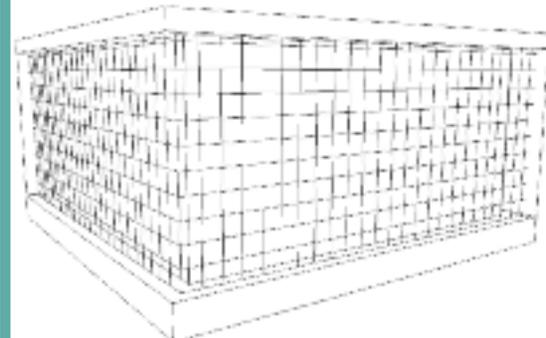


Fig. 188 Des treillis électro-soudé existants en double couche près des faces du mur pourraient être utilisés comme renforcement.

Coche simple de treillis soudé

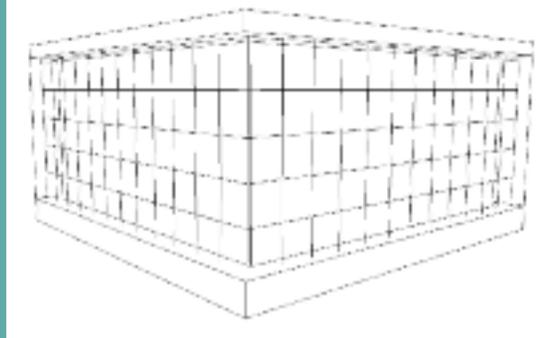


Fig. 189 Des treillis électro-soudé avec des carreaux plus grands pourraient être développé pour des zones de moyenne sismicité.

Grille de bambou à 45°

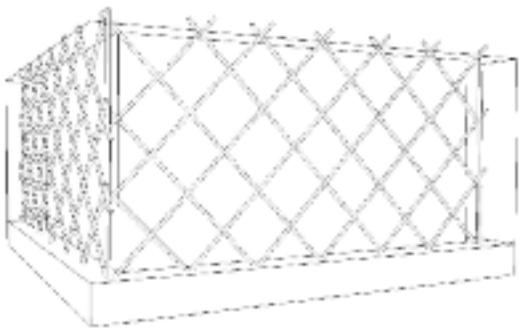


Fig. 190 Un renforcement avec des grilles à 45° aurait un contreventement plus fort, aurait plus de rigidité et plus de résistance aux efforts horizontaux.

Double couche de grille de bambou à 45°

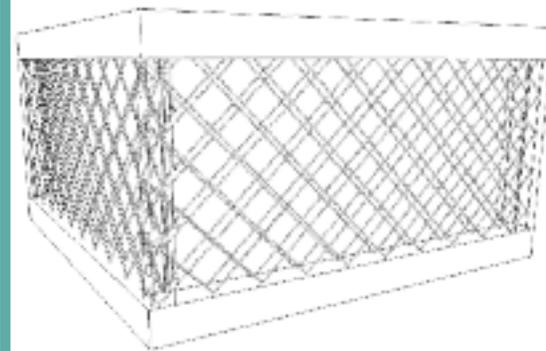


Fig. 191 Une double couche de grilles écartées de quelque centimètres des faces du mur, donnerait des murs encore plus résistants.

## RENFORCEMENT AVEC DES GRILLES ET AVEC UN TREILLIS 3D

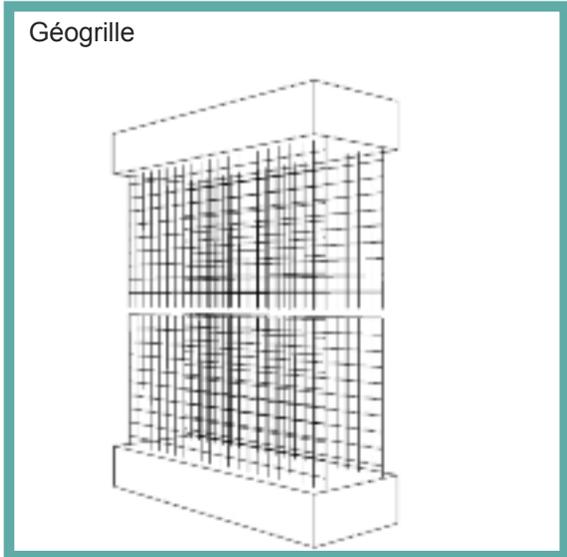


Fig. 192 Matériaux : acier, géogridde, fibres naturelles. La première idée de renforcement avec grilles a été de Lynn S. Nelson en 1982, voir page 57.

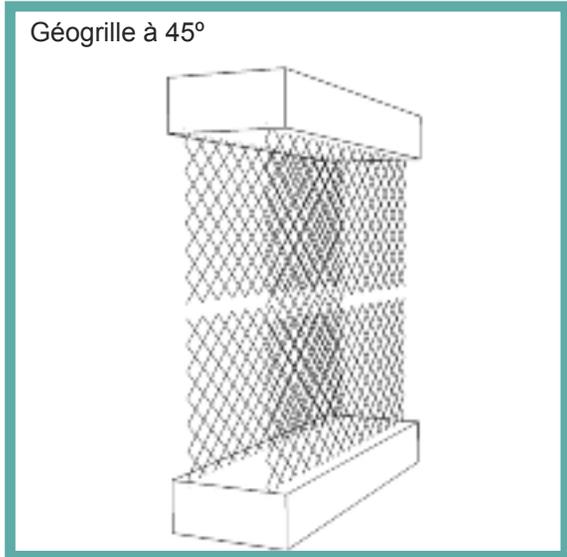


Fig. 193 Matériaux : acier, géogridde, fibres naturelles. Si la grille est placée à 45° le contreventement se fait de meilleure façon.

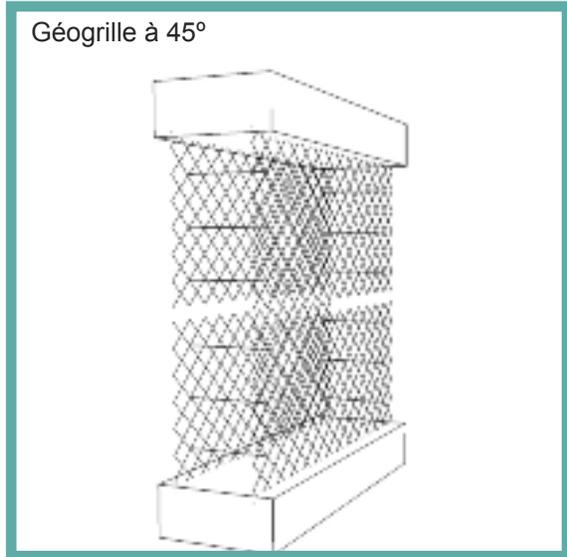


Fig. 194 Des éléments horizontaux entre les deux grilles aident à ce qu'il n'y ait pas d'écartement entre les deux grilles pendant un séisme.



Fig. 195 Matériaux : acier, plastique, fibres naturelles. Des treillis 3D pourraient être spécialement conçus pour des murs en terre coulée.

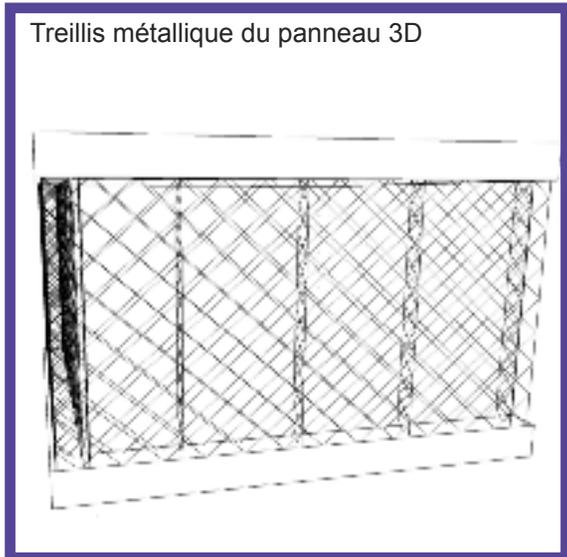


Fig. 196 Des panneaux plus grands de treillis 3D avec des carreaux plus grands pourraient être développés.

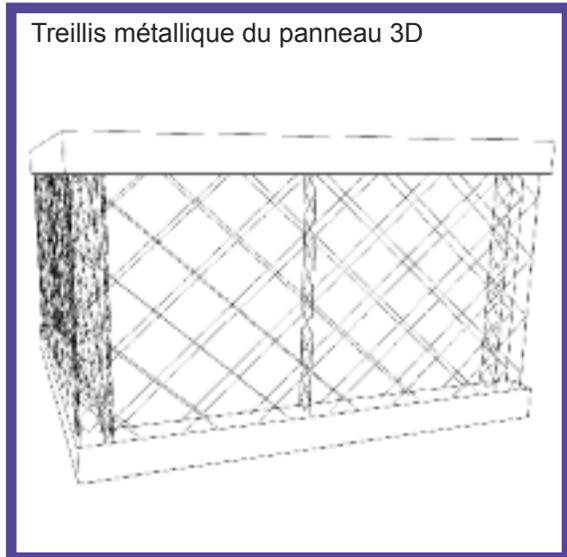


Fig. 197 Si le degré de sismicité le permet, des carreaux encore plus grands pourraient s'utiliser dans le treillis spécialement conçu.

## Potentialités du Treillis 3D



Fig. 198 Des treillis 3D en acier et fibres naturelles pourraient être développés pour des murs en terre coulée. Fixation dans soubassement et poutre.



Fig. 199 Cette photo montre un treillis métallique du panneau 3D, qu'illustre le dessin précédent. (Pics&Fotos, 2014)

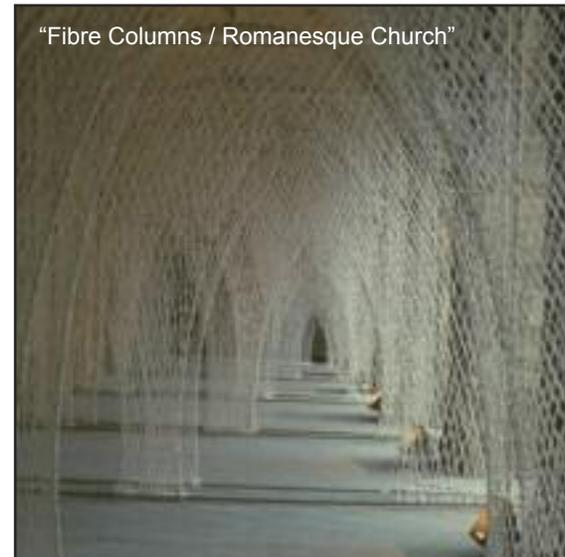


Fig. 200 Cet œuvre d'art : "Fibre Columns / Romanesque Church" de Toshiko Horiuchi en 2012 (Arch daily, 2014), inspiration pour nouveaux treillis.



Fig. 201 Structure de la "Maison Batuco" de Marcelo Cortés au Chili, avec l'utilisation de grille métallique. (Cortés, 2012)



Fig. 202 Remplissage à la main avec un mortier de terre fibrée avec paille. (Cortés, 2012)



Fig. 203 Diverses fibres naturelles pourraient être utilisées pour la création de nouveaux treillis. (Be Healthy and Well, 2012)

## RENFORCEMENT DIAGONAL

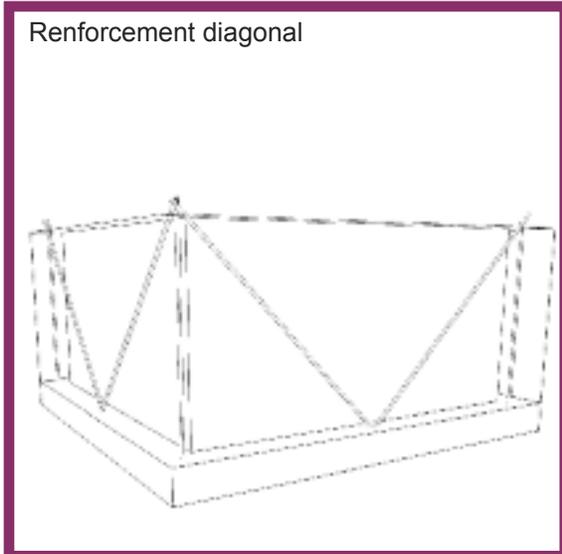


Fig. 204 Matériaux : bois, bambou, acier. La terre coulée permet d'intégrer dans les murs des éléments de renforcement placés diagonalement.

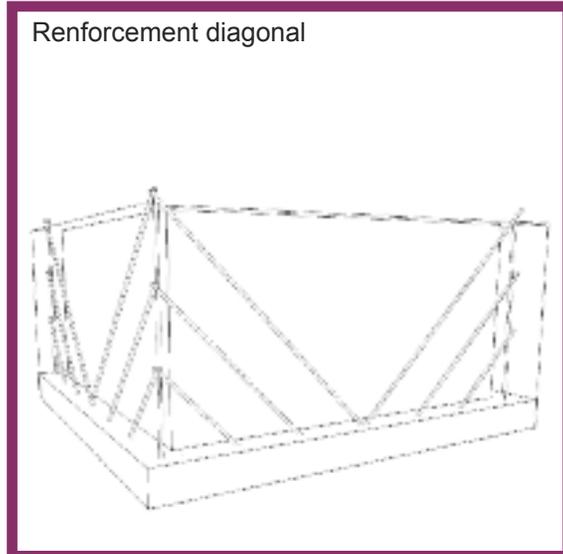


Fig. 205 Matériaux : bois, bambou, acier. La terre coulée permet d'intégrer dans les murs des éléments de renforcement placés diagonalement.

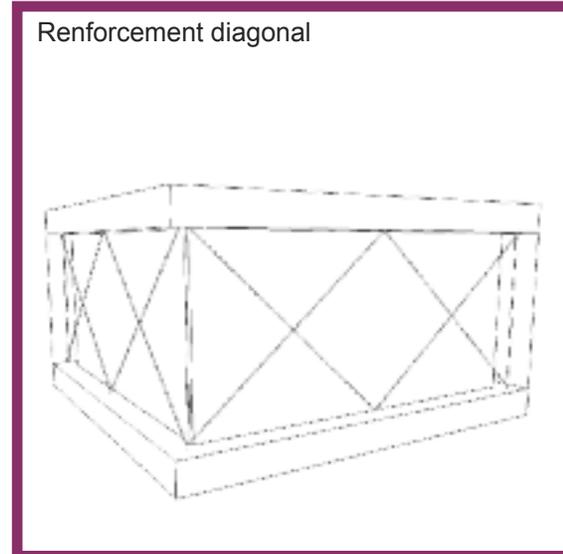


Fig. 206 Cet armature pourrait être réalisée en bois, bars d'acier, câbles d'acier et cordes de fibres naturelles. Formule avec rétrécissement réduit.

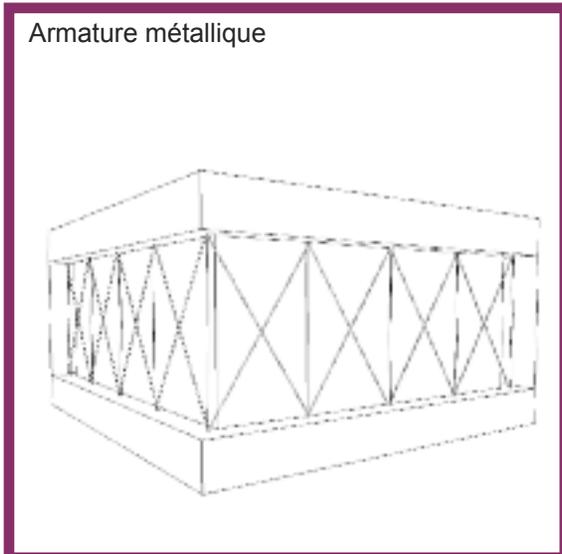


Fig. 207 Cet armature pourrait être réalisée en bars d'acier, câbles d'acier et cordes de fibres naturelles. Formule avec rétrécissement réduit.

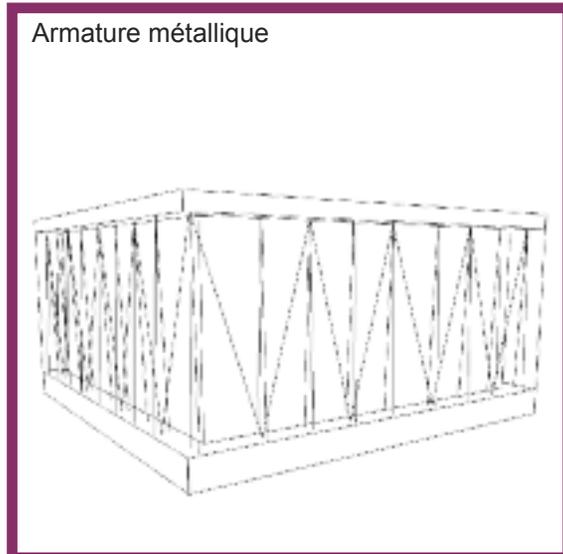


Fig. 208 Cette armature pourrait être réalisée en bars d'acier, câbles d'acier et cordes de fibres naturelles. Formule avec rétrécissement réduit.

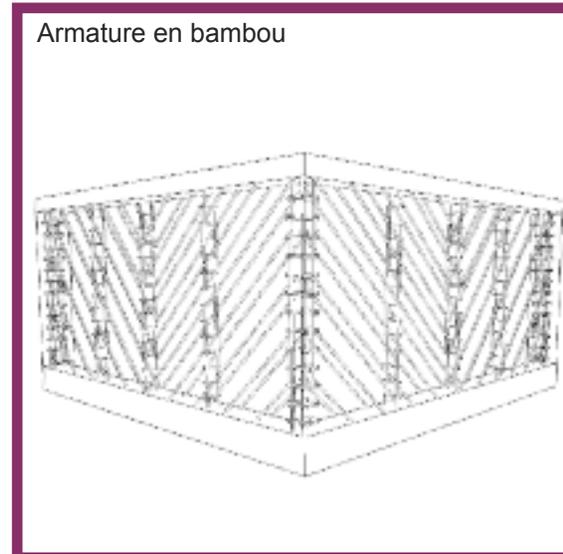


Fig. 209 Ce dessin est une adaptation pour la terre coulée des structures en torchis. Formule fibrée avec un rétrécissement réduit.

## RENFORCEMENT AVEC DES ARMATURES

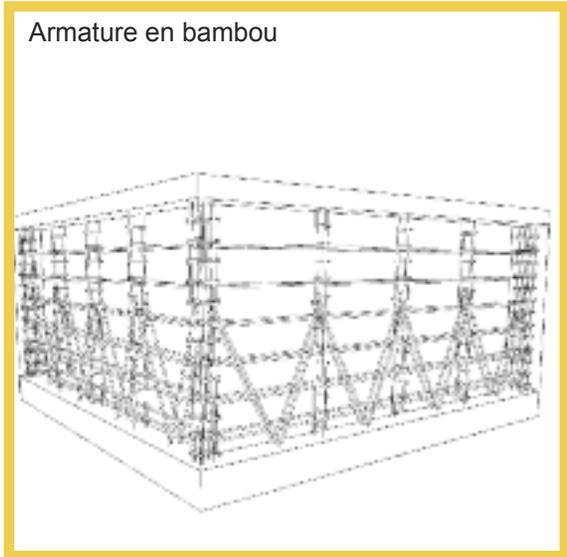


Fig. 210 Cette proposition d'armature en bambou est une modification de l'armature de l'architecte Wilfredo Carazas pour son système constructif « Ceren ».

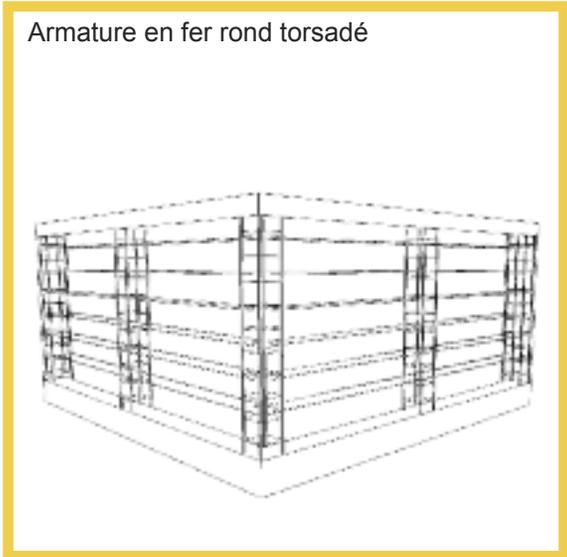


Fig. 211 Inspirée des structures en torchis, cette armature pourrait s'utiliser avec une formule sans trop de ciment, mais avec un rétrécissement réduit.

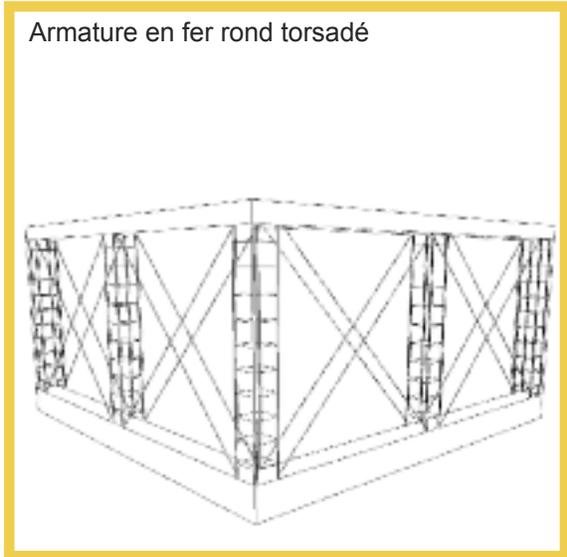


Fig. 212 Cette armature en acier pourrait s'utiliser avec une formule sans trop de ciment, mais avec un rétrécissement réduit.

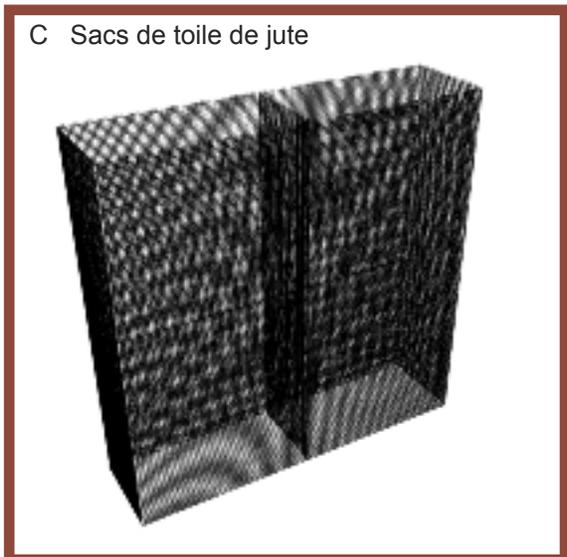
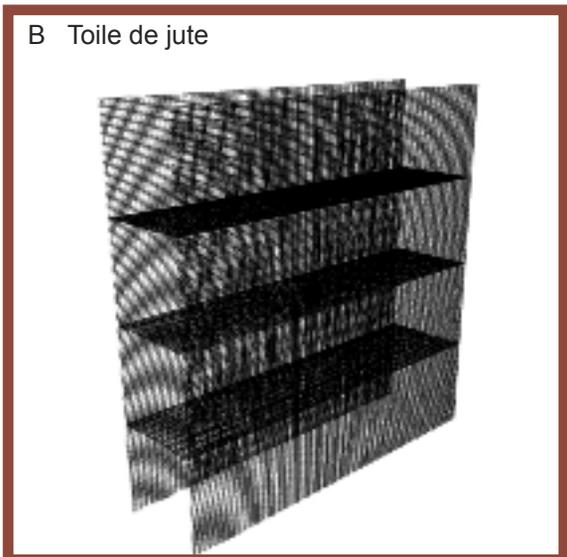
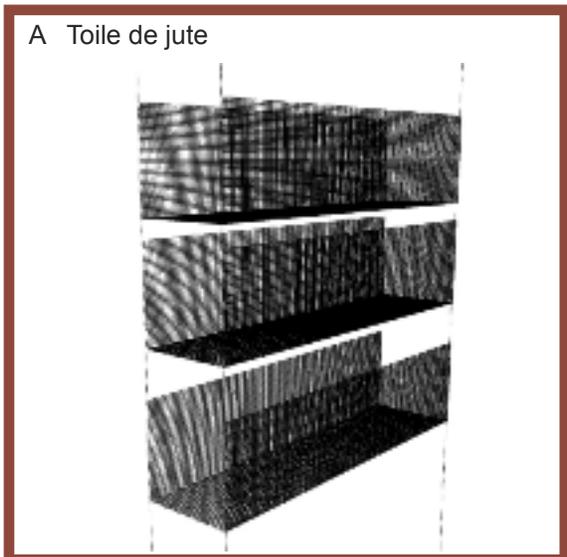


Fig. 213 La toile de jute ou d'autres fibres naturelles pourrait s'utiliser également comme matériau de renforcement de murs en terre coulée. Il pourrait y avoir diverses manières de placer le renforcement, comme les dessins A, B et C le montrent. Pour le dessin A, on met le renforcement au fur et à mesure que le coulage se fait. Pour le dessin B, on a une toile de chaque face de mur et on met des pièces de toile horizontalement. Pour le dessin C, il s'agit de sacs qui seraient spécialement conçus.



4.4 L'expérimentation

## 4.4 L'expérimentation

Dans ce chapitre je présente les préparatifs des essais qui sont en cours actuellement. Je présente l'objectif, les personnes qui ont participé et qui participent. Je continue avec les caractéristiques des corps d'épreuves réalisés et leur processus de réalisation. Ensuite, je décris le fonctionnement de la machine utilisée et du protocole qui va être suivi. Finalement, je présente l'expérience de réaliser trois fois le premier essai sans pouvoir être capable de le conclure.

En vue de connaître les différences de comportement sous charges cycliques de trois types de renforcement différents, huit murets en terre coulée ont été réalisés. Six pendant le Festival Grains d'Isère 2014 et deux autres juste après. Ces réalisations ont été faites dans le cadre du postdoctorat de Florent VIEUX-CHAMPAGNE et dans le cadre du mémoire du DSA d'Abrisseth HERNANDEZ, avec la collaboration de Julien MORIN, Arnaud BERGER, Arthur LEFEBVRE, étudiants de master 1 d'ingénierie de la IUT, pour les 4 premiers murets. Avec la collaboration de Mauricio CORBA, Enrique SEVILLANO (DSA 2012-2014) et Etienne SAMIN (ancien DSA) pour deux autres. Et avec la collaboration de Mauricio CORBA pour les deux derniers murets. Ces dimensions sont 95 cm de longueur, 35 cm de largeur et 86 cm de hauteur. Ces dimensions sont les mêmes que celles des murets en adobe d'une étude précédente réalisée par Vieux-Champagne. Ce choix a été fait pour comparer les résultats de deux études entre elles. Les murs sont nommés

de A à H. La fig. 216 montre un tableau avec l'information générale des murets.

### 4.4.1 « Essai de chantier »

Les matériaux utilisés pour faire le mortier des murs ont été : de la terre à piser d'une autre carrière tout près de la carrière de Brézins, du sable marin et du sable à béton 0-15. On savait qu'avec la terre à piser de Brézins, dans une proportion 1:2 ou 1:2½ (terre:sable à béton) on pouvait faire de la terre coulée. Mais comme la terre à utiliser n'était pas exactement de la même carrière, un procédé simple de formulation a été suivi. Un des BigBags du sable à béton, avait une couche de gravier dans la partie supérieure, ce qui donnait à penser que ressemblé au début avoir seulement du gravier. J'ai fait différents mélanges avec de la terre à piser, du sable marin et du gravier, dans les proportions suivantes : (terre:sable:gravier + 4% de ciment) 1:1:1 (avec et sans ciment); 1:1 ½ :1 ½ et 1:2:2. Quatre blocs ont été coulés. Les proportions qui on donné un matériau plus cohésif et moins friable était le premier et le deuxième. La différence entre les deux blocs de la même proportion avec et sans ciment a été que le bloc sans ciment avait ses coins plus friables. Le bloc sans ciment a présenté une bonne cohésion d'ensemble. Avec ses observations on a fait 5 gâchés avec la formule suivante, par gâché on a utilisé :

3 seaux de terre à piser  
3 seaux sable marin  
3 ½ seaux gravier 12mm  
4 litres de ciment 52,5R

Quatre gâchés ont été nécessaires pour remplir chaque muret. À la cinquième gâche, il n'y avait plus le gravier dans BigBag. Au moment de s'en apercevoir, on avait un seau de sable marin dans la bétonnière pour préparer la sixième gâché. Pourtant on a complété cette gâché avec 5 seaux de sable à béton. Pour la gâché suivante on a mis 5 seaux de sable à béton et la terre. La surprise a été que la consistance n'était pas du tout la même. On ne pouvait plus vibrer le mélange. J'ai dû reformuler à ce moment. L'indicateur a été d'avoir la consistance des quatre premières gâchés. On a utilisé la formule suivante pour faire les restes des gâchés :

3 ½ seaux de terre à piser  
1 seaux sable marin  
5 seaux sable à béton 12mm  
4 litres de ciment 52,5R

Deux murets avaient été déjà faits. Pour vérifier la deuxième formulation, j'ai fait quatre autres blocs. Les proportions ont été les suivantes : (terre:sable marin:sable à béton 4% de ciment), 3 ½:1:5, 3 ½:2:4, 3 ½:0:5, 3 ½:1:6. La proportion de 3 ½:1:5 a été retenue.

Fig. 215  
Échantillons  
de formulation.



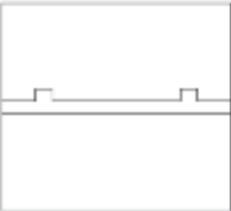
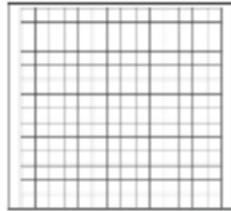
MUR	A	B	C	D	E	F	G	H
MÉLANGE	1	2	2	2	2	2	2	2
RÉALISATION	27.05.2014	27.05.2014	28.05.2014	28.05.2014	29.05.2014	29.05.2014	26.06.2014	26.06.2014
ÂGE en J	--	--	--	--	--	--	--	--
	sans renfort		inclusion bois (Fig. 218)		géogridde horizontale (Fig. 219)		géogridde verticale (Fig. 220-221)	
								
FISSURES	NON	NON	OUI (page 95)	OUI (page 96)	NON	NON	NON	NON
FORCE DEPLACEMENT								

Fig. 216

## 4.4.2 Renforcement

Les murets A et B sont les témoins, ils n'ont pas de renforcement. C et D ont une inclusion bois horizontale en forme d'échelle à mi-hauteur du muret (fig.100). E et F ont deux renforcements horizontaux de géogrille en plastique ( de 35 x 95 cm) à 24 et 48 cm de la basse du muret. Les murets G et H ont des renforcement verticaux dans les deux faces longitudinales du murets. Ils sont attachés avec des grilles horizontales en bas et en haut. Les premiers 14 et les derniers 14 cm du muret on été coulés en béton conventionnel avec l'objectif de bien attacher les grilles. Entre les deux parties de béton il y a de la terre coulée. Il y a également six morceaux de grilles attachés entre les grilles verticales pour les empêcher de s'écarter ver l'extérieur (fig. 220). Voir cadre des caractéristiques générales des murs dans la page précédente.

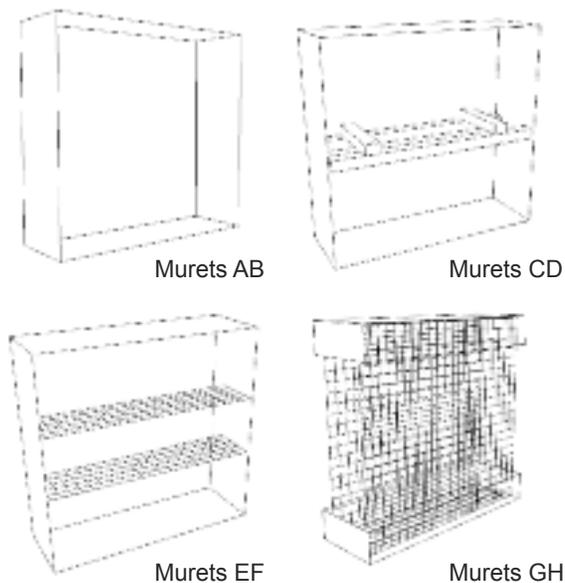


Fig. 217 Armatures des murets.



Fig. 218 Murets C,D. Photo d'une inclusion bois horizontale en forme d'échelle utilisée dans deux murs.

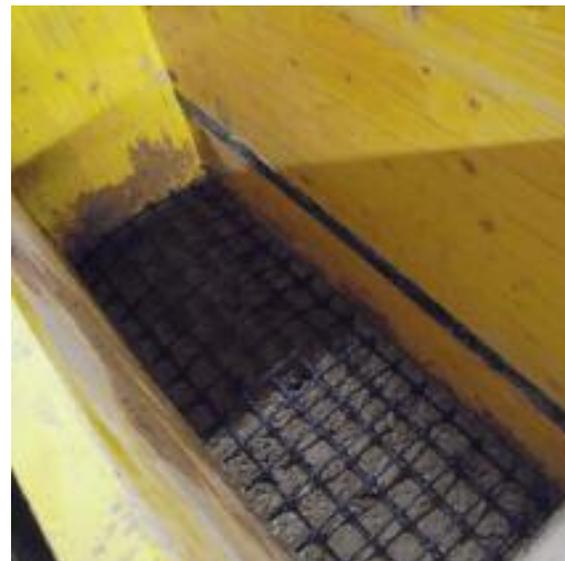


Fig. 219 Murets E,F. Cette image montre un renforcement horizontal de géogrille en plastique.



Fig. 220 Murs G,H. Des renforcements avec géogrille dans les deux faces longitudinales du murs. On a utilisé une géogrille TENAX 3d Grid XL rigidité a 0,5% déformation à 900MPa.



Fig. 221 Murets G,H. Les grilles placées horizontalement sont prises dans le béton en bas et en haut.

#### 4.4.3 Mise en œuvre

Le procédé de mise en œuvre a été le suivant. On a préparé le mortier en bétonnière, **fig. 223**. On a utilisé la moindre quantité d'eau possible pour arriver à vibrer le mortier. Trois prélèvements par bétonnières ont été pris et séchés à l'etuve. Les résultats ont permis de constater que les gâchés étaient à 10% de teneur en eau. De la bétonnière on versait le mortier en gammate pour le transporter et le verser dans le coffrage. On a vibré le mortier après avoir versé chaque gâché. Pour les murets D,C,E et F, on a versé du mortier jusqu'à la hauteur désirée pour chaque renforcement, et on a continué à le couler.

Pour les murets G et H, deux morceaux de géogridde ont été fixés avec des vis et fils de fer au plancher bois qui aide à transporter les murets. Six morceaux de géogridde ont été fixés pour éviter l'écartement des deux géogriddes verticales. Une fois le coffrage placé, j'ai placé deux tasseaux sur le coffrage au dessus de l'axe de géogridde. Ensuite avec des fils de fer qui prenaient le tasseau et la géogridde, j'ai tiré la géogridde jusqu'à une certaine tension, **fig. 225**. La consistance du mortier était presque plastique, pourtant l'espace entre les faces du coffrage et la géogridde verticale a été remplie à la truelle. Pour ce type d'armature, une formule avec dispersant serait nécessaire à utiliser lorsqu'une mise en œuvre en chantier se ferait. La surface supérieure des murets a été talochée pour lui rendre son aspect final. Les murs ont été décoffrés le matin suivant au jour de coulage. Les murs ont suivi une cure humide de 7 jours.



Fig. 222 Assemblage de panneaux de coffrage.



Fig. 223 Photo d'un de deux équipes en trains de travailler.



Fig. 224 Géogridde fixée avant le placement du coffrage.



Fig. 225 Fixation des géogriddes aux tasseaux bois et remplissage à la truelle entre les faces du coffrage et la géogridde.

#### 4.4.4 Densité et rétrécissement

Deux blocs de 1800 cm<sup>3</sup> ont été réalisés pour mesurer la densité apparente qui est de 2031kg/m<sup>3</sup>.

Quatre échantillons de 4 x 6 x 60 cm ont été réalisés pour mesurer le rétrécissement de la formule utilisée. Deux échantillons seulement ont présenté des fissures de moins d'un millimètre. Sur le 60 cm il n'y a pas eu de rétrécissement observable, [fig. 226](#). Dû au manque d'un instrument de mesure de précision, le rétrécissement n'a pu être mesuré.

Quatre murets ont été mesurés et le seul rétrécissement observable a été la réduction d'un centimètre de hauteur des murets.

#### 4.4.5 Test de compression

Vingt éprouvettes cylindrique ont été réalisées pour connaître la résistance en compression du matériau utilisé. Aucun protocole n'a été suivi, je me suis documenté après la réalisation des échantillons. C'était en faisant que j'ai commencé à avoir des doutes sur la bonne manière de procéder. Les éprouvettes ne sont pas encore testées.

#### 4.4.6 Granulométrie

J'ai fait la granulométrie de la terre à piser et la granulométrie de la formule utilisés. Les résultats se montrent dans la [fig. 234](#), page 97.



Fig. 226 Échantillons faites pour observer le rétrécissement de la formule employée.



Fig. 227 Fissures du rétrécissement du muret C du à l'inclusion bois.



Fig. 228 Fissures du rétrécissement du muret C du à l'inclusion bois.



Fig. 229 Fissures du rétrécissement du muret D du à l'inclusion bois.

#### 4.4.7 Fissuration des murs

Seulement les murets C et D ont fissuré pendant le séchage. Les fissures du muret C vont vers l'axe central du mur, fig. 227 et 228. Celles du muret D vont vers les côtés du murs, fig. 229. Ceci ne veut pas dire qu'il n'est pas possible d'utiliser du renforcement horizontal dans les murs en terre coulée. Les fissures sont dues à la configuration de l'inclusion utilisée avec ses éléments dans deux axes différents, fig. 218. Pour éviter les fissures, les éléments des inclusions bois doivent être sur un même axe, ce qui implique un travail de menuiserie préalable. Le mur doit être coulé en couches. Chaque couche s'arrête à la hauteur du renforcement. Les vides de l'inclusion se remplissent en un deuxième temps, suivi de la couche suivante du mur. Et ainsi de suite pour chaque renforcement horizontal à placer.

#### 4.4.8 Protocole d'essai

Le protocole de chargement oligo-cyclique permet de caractériser différents paramètres du comportement du mur en cisaillement. Notamment ceux l'endommagement après plusieurs cycles réalisés à la même amplitude de déplacement ainsi que l'endommagement cumulatif observable après chaque cycle. "Pour observer ce dernier, on doit normalement réaliser un essai monotone (chargement dans une seule direction) afin de ne pas avoir d'endommagement "cyclique". Le chargement



Fig. 230 Décoffrage du premier mur.



Fig. 232 Murets G et H avec une section de terre coulée entre deux section de béton.



Fig. 231 Équipe de travail intégrée par Florent VIEUX-CHAMPAGNE, Julien MORIN, Arnaud BERGER, Arthur LEFEBVRE, et l'auteur.



Fig. 233 Vue des murets réalisés.

## Granulométrie de la terre à piser et du mélange de terre coulée

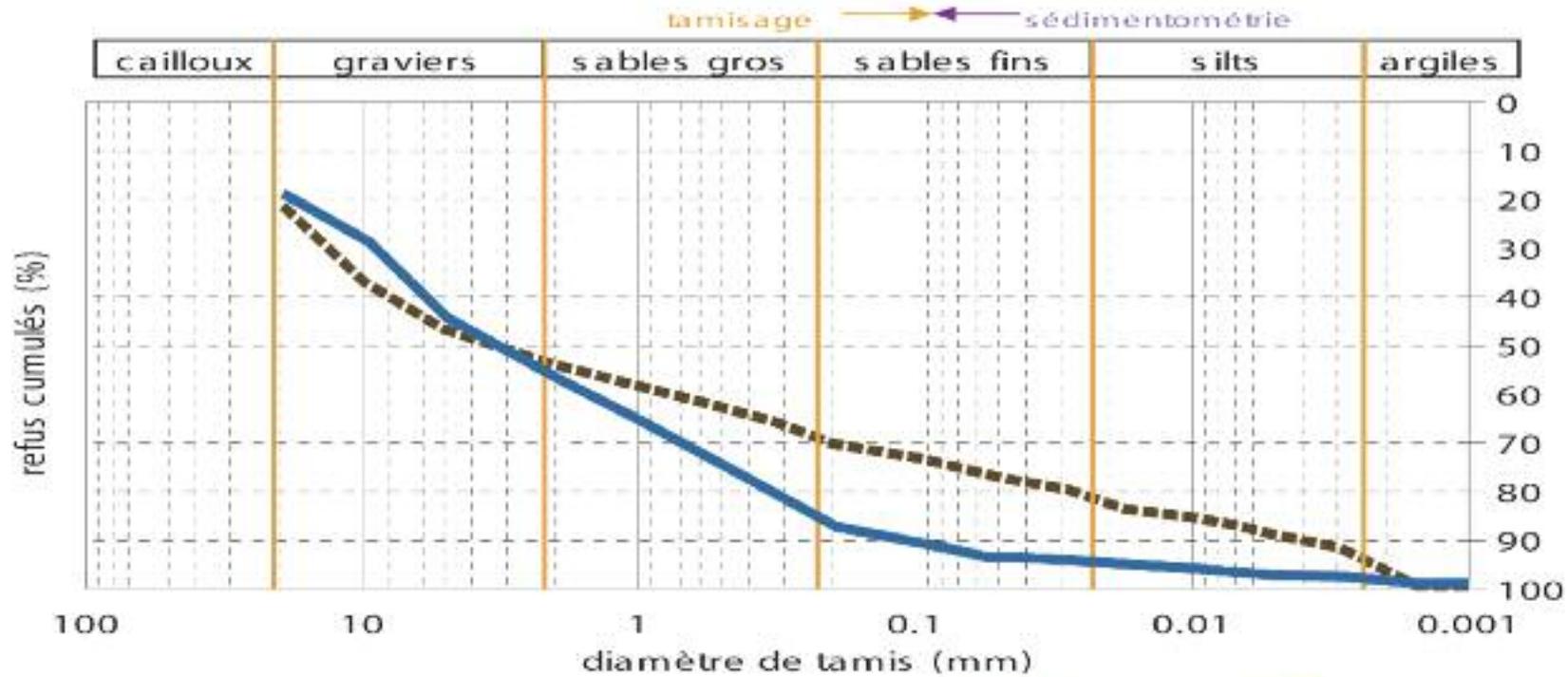


Fig. 234

oligo-cyclique permet également d'observer le comportement post-pic (qui est à comparer avec le chargement monotone). La capacité max de la machine correspond a priori à la capacité max du vérin à savoir, 40kN en terme d'effort et +/- 20cm en terme de déplacement. Ensuite, tu es limité en dimensions des échantillons comme tu as pu le constater. Les essais sont pilotés quant à eux par un capteur lvdt (Linear Variable Differential Transformer) +/- 10 cm à vitesse constante de 0.05 mm/sec. (Texte de Florent Vieux-Champagne).

Terre à piser
20.11% Cailloux
32.50% Graviers
19.80% Sables
17.60% Silts
9.90% Argiles
Terre coulée
20% Cailloux
36.40% Graviers
33.52% Sables
7.20% Silts
2.88% Argiles

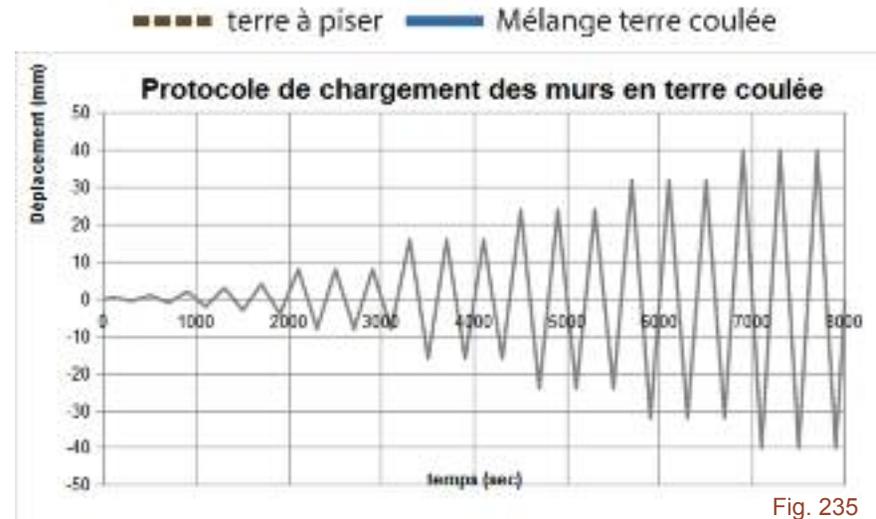


Fig. 235

#### 4.4.9 Premier essai

Pour éviter que les murets tournent pendant l'essai et pour bien les immobiliser, une chaussette en béton a été coulée de la même façon avec les dimensions qui ont été utilisés pour les essais des murets en adobe testés précédemment. Pendant le premier essai, la chaussette en béton se casse et le muret s'est mis à tourner. On a du arrêter l'essai. On a refait la chaussette cette fois ci avec des profils en acier fixés à la machine avec des tiges filetées, fig. 236. Pour le deuxième essai, la chaussette s'est cassée et le profil en acier se tordait pendant l'essai. Le muret s'est fissuré dans l'axe des vis qu'on avait mis pour accrocher le muret à la chaussette en béton, fig. 237 et 238.

On a saturé le capteur de force de 25kN et une des pièces de la machine s'est dessoudée pendant l'essai. Pour pouvoir terminer l'essai on a refait une chaussette en béton de plus grandes dimensions avec des tiges en acier pour prendre les efforts de traction, voir fig. 239.

Un rapport avec les résultats sera rédigé une fois les essais conclus.



Fig. 236 Deuxième manière de fixer le muret à la machine.



Fig. 237 Fissuration du muret dans l'axe des vis d'ancrage.



Fig. 238 Fissuration du muret dans l'axe des vis d'ancrage.



Fig. 239 Troisième manière de fixer le muret à la machine avec des tiges en acier pour prendre les efforts de traction.

# Conclusion

On sait maintenant qu'il est possible de construire en terre coulée dans des zones sismiques. Les connaissances en génie parasismique nous permettent de dire que ce n'est pas seulement les matériaux en soit qui vont donner à une structure un comportement dynamique adéquat face aux séismes, mais aussi la manière dont les matériaux sont disposés entre eux, l'action conjointe de tous les éléments constructifs, la configuration et la conception d'une construction et de ses détails constructifs, et la qualité de la main d'œuvre (INTERTECT, 1994).

L'ajout d'armatures dans la terre coulée et une conception architectonique suivant des critères précis permet donc d'affirmer l'hypothèse de départ.

L'état de l'art présenté sur la terre armée, m'a permis de repérer les critères, principes et règles de conception pour rendre parasismique les constructions en terre coulée. Il m'a également permis de connaître une variété des types de renforcement différents, ainsi que les matériaux qui sont utilisés pour ce propos. Le corpus de ces connaissances avec des modifications pertinentes sont tout à fait applicables à la terre coulée. Je noterais ici que la collecte des données et des informations sur la terre armée et la terre coulée, a été spécialement difficile et longue. Ceci est dû à ce que les sources sont très peu nombreuses, très diverses et très éparpillées.

Ce mémoire exploratoire permet une synthèse sur la terre armée et les typologies d'armatures adaptées. La concentration d'information sur la terre coulée avec des données, des photos et des expériences d'autres personnes, ainsi que l'éclairage sur la formulation sont également un deuxième intérêt de ce travail. Enfin, l'exploration de pistes de réflexions sur le renforcement parasismique, la recherche sur les types d'armatures pour la terre coulée, et les essais de mise en œuvre permettent d'ouvrir le sujet, tout en validant certaines hypothèses de manière concrète. Mais sans doute, l'apport principal de ce mémoire est de soulever la question relative à l'interaction de la terre, et les fibres et les armatures dans les éléments constructifs. C'est l'étape initiale de la réflexion scientifique sur la manière de disposer ensemble grains, fibres et armatures pour faire des matériaux composites de « performances augmentées », à base de terre.

Les huit murets en terre coulée, réalisés pendant la période de ce mémoire, sont en train d'être testés sous chargement cyclique. C'est un travail conjoint avec Florent Vieux-Champagne (Craterre/AECC/Labex), Yannick Sieffert (Maître de conférence, UJF) et Jean-Benoît Toni (assistant ingénieur, CNRS). On a démarré les essais avec l'objectif de compléter la campagne expérimentale une semaine avant de la

soutenance de ce mémoire. Des contraintes non prévues liées à la machine nous ont fait arrêter temporairement les essais. Un rapport avec les résultats sera rédigé ultérieurement.

À la fin de mon mémoire, j'ai beaucoup plus de questions qu'au début, à caractère général et sur le comportement grains-fibres-armatures.

Des questions sur l'intérêt social de la terre coulée dans différents pays. Sur les domaines, les contextes, les applications et la pertinence d'utilisation. Sur la diversité d'éléments constructifs qui pourraient être conçus et leur intégration avec d'autres systèmes constructifs et d'autres techniques de construction en terre. D'autres questions plus techniques se posent sur les configurations possibles de renforcement et armatures, leurs performances et leurs apports sur l'amélioration du comportement dynamique des éléments constructifs. De même qu'en est-il de l'intégration, adhérence et travail conjoint des grains, fibres et armatures ? Il serait très intéressant de suivre la voie de la terre coulée sans ciment : étudier les temps de séchage, les coffrages respirant et perdus. Toutes ces questions sont autant des sujets à approfondir et des thématiques de recherche.

J'ai peu montré les potentialités architectoniques de la terre coulée. Suivant les contextes, il est possible d'imaginer un renouveau de la construction en terre à

travers cette technique. Tout comme le béton de ciment à ces débuts, la terre coulée armée ouvre des nouveaux horizons techniques et formels.

Au cours de mes recherches, j'ai découvert les concepts de Ferrigni autour des cultures constructives parasismiques locales, et j'ai pris conscience de l'écart entre les connaissances en génie parasismique (et leurs limites) et les phénomènes physiques réels à l'échelle 1 (Ferrigni, 2005). De plus, le génie parasismique, en se concentrant sur d'autres matériaux plus conventionnels, a laissé de côté les matériaux locaux comme la terre. De nos jours l'étude des cultures parasismiques en terre et en terre armée sont une source d'inspiration, une encyclopédie de connaissances. Associées à l'expérimentation, aux connaissances scientifiques récentes et à l'ingénierie, on pourra avancer sur notre compréhension afin d'optimiser la disposition conjointe des grains, des fibres, et des armatures.

**La terre coulée armée**

DSA-Architecture de terre 2012-14: Abriseth HERNANDEZ

# Bibliographie

## Liste des ouvrages consultés:

**AFPS.** (2003). «Guide de la conception parasismique des bâtiments». Association française du génie parasismique (AFPS). Collection Blanche BTP. Eyrolles, France, 2003. 160p.

**ARANDA** Jiménez, Gpe. Yolanda, (2014). «Manual de construcción: Prototipo de vivienda de tierra vertida y bambú». Proyecto No. 175615: Vivienda Experimental Sustentable. FOMIX-COTACYT. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Tampico, Tamaulipas, México, 2014.

**CARAZAS** Aedo, Wilfredo, RIVERO Olmos Alba, (2001). «Torchis. Guide de construction parasismique». [En ligne] MISEREOR, 2001. Disponible sur : <<http://www.misereor.org/fileadmin/redaktion/Torchis%20-%20Guide%20de%20construction%20para%20sismique.pdf>> (consulté le 8 avril 2014)

**CAMPANA**, Cristóbal. (2000) «Tecnologías constructivas de tierra en la costa norte prehispánica». A&B Editores S.A. Instituto Nacional de cultura – La Libertad. Trujillo 2000.

**FERRIGNI**, F. (2005). «Ancient buildings and earthquakes. The local seismic culture approach: principles, methods potentialities». Collection Rischio sismico et patrimonio culturale 1. Bari, Edipuglia, 2005. ISBN: 88-7228-403-1

**FONTAINE&ANGER**, (2009). «Bâtir en terre». éd. Belin, 2009

**GRÜNTAL**, G. (2001) «L'Échelle Macro-sismique Européenne. European Macrossismic Scale 1998». Conseil de l'Europe. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Volume 19 Édition française A. Levret. Luxembourg 2001. 53p

**HOUBEN**, Hugo, GUILLAUD, Hubert. (2006) «Traité de construction en terre» CRAterre. Parenthèse, 1989 1re édition. Marseille 2006. 355p. ISBN 2-86364-161-1 (Houben, Guillaud, 2006)

**House DIY** «Anti-seismic rammed earth village : house diy construction manual » ISBN : 9787112112302

**INTERTECT.** (1994). «Vernacular housing in seismic zones of India». University of New-Mexico, Washington US AID, 1994. 151p

**KOK, A. W. M., SOVERO, G.**, (1996). «Earthquake resistant construction of low cost adobe housing - Final report» éd. Delft : CICAT - Delft University of Technology, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 157p.

**LE TIEC**, Jean-Marie, PACCOUD, Grégoire. «Pisé H2O » CRAterre, 2006. 40p.

**LEROY TOLLES**, E. WEBSTER, Frederick A. CROSBY, Anthony, KIMBRO, Edna E. (1996) «Survey of Damage to Historic Adobe Buildings After the January 1994 Northridge Earthquake». [En ligne] The Getty Conservation Institute. The J. Paul Getty Trust, Los Angeles, 1996. 171p Disponible sur : <[http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/adobe\\_northridge.pdf](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/adobe_northridge.pdf)> (consulté le 8 avril 2014)

**MINKE**, Gernot (2001). «Manual de construcción para viviendas antisísmicas en tierra». [En ligne] 2ème éd. Kassel : Universidad de Kassel, 2001. 51p. Disponible sur : <[http://www.itacanet.org/esp/construccion/Construccion\\_tierra.pdf](http://www.itacanet.org/esp/construccion/Construccion_tierra.pdf)> (consulté le 12 avril 2014)

**MOEVUS**, Mariette. Co-auteurs: FONTAINE, Laetitia, ANGER, Romain, DOAT, Patrice. (2013) Projet: «Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.) Rapport Final» Programme C2D2 Coordination: Valérie Wathier. Novembre 2013. 877p. (Moevus, B.A.E., 2013)

**MORRIS**, Hugh. «New Zealand: Aseismic Performance-Based Standards, Earth Construction, Research, and Opportunities». 15p. [En ligne] [s.l.][s.n.] Disponible sur : <[https://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/gsa\\_p\\_part2b.pdf](https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/gsa_p_part2b.pdf)> (consulté le 18 août 2014)

**NIKER** (2010). «New integrated knowledge based approaches to the protection of cultural heritage from earthquake-induced risk». [En ligne] Università di Padova 2010.

Disponible sur :  
<<http://www.niker.eu/downloads>> (consulté le 8 avril 2014)

**OLARTE**, Jorge Luis, **GUZMAN**, Evelin (1993). «Manual de edificación con tierra armada. Diseño, cálculo y construcción con el sistema CET» 1er éd. San Francisco de Sales : Dirección General de Arquitectura, 1993. 147p ISBN 84 451 0726 7

**SERGHINI IDRISSE**, Youssef. (2013) «Caractérisation du comportement en compression localisée de murs stabilisés au ciment valorisant des déchets de carrière». Institut National des Sciences appliquées de Lyon. Génie civil et urbanisme. Juillet 2013. 83p. (Serghini, 2013)

**SOVERO** M. Guillermo, **QUISPE** F. Edmundo. « Ensayos cuasi-estáticos de modelos de viviendas de adobe de dos pisos sobre plataforma rebatible » IIUR Instituto de Investigación universidad y región cusco Peru.

**ZACEK**, Milan. (1996) «Construire parasismique. Risque parasismique. Conception parasismique des bâtiments. Réglementation.» Éditions Parenthèses. Marseille France 1996. 340p. ISBN 2-86364-054-2

## Liste de thèses et mémoires

**ANGER**, Romain. «Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction». École Doctorale Matériaux de Lyon (EDML), l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 20 décembre 2011. 240p

**BANKER-HIX**, Wyatt Adair.(2014). «The effect of clay, cement and fibers on the strength and durability of compressed earth blocks» [En ligne] Master of Science in Civil and Environmental Engineering. Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, Juin 2014. consulté le 30 juillet 2014)

**CHANSAVANG**, Quentin, **GASNIER**, Hugo.(2012) «Un approche prospective du pisé» École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, ENSAG. Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement d'Architecture de terre 2010-2012. Ministère de la Culture et de la Communication.150p.

**GAW**, Bryan, **ZAMORA**, Sofia. «Soil Reinforcement with Natural Fibers for Low-Income Housing Communities». Worcester Polytechnic Institute. Degree of Bachelor of Science.

**MOLLION**, Vincent, étude du comportement mécanique du pisé, rapport master, ENTPE, 2009, 115 p.

**SIMENSON**, Eric Walter. (2011) «Rammed earth: fiber-reinforced, cement-stabilized» [En ligne] B.S., University of Colorado Denver. Denver, 2011. 121p Disponible sur : <[http://digitool.library.colostate.edu//exlibris/dtl/d3\\_1/apache\\_media/L2V4bGlicmlzL2R0bC9kM18xL2FwYWNoZV9tZWRpYS8yNzAzNDg=.pdf](http://digitool.library.colostate.edu//exlibris/dtl/d3_1/apache_media/L2V4bGlicmlzL2R0bC9kM18xL2FwYWNoZV9tZWRpYS8yNzAzNDg=.pdf)> (consulté le 30 juillet 2014)

## Liste de revues consultés:

**BARROS**, L.P., **IMHOFF**, F.A., 2010. «Resistencia sísmica del suelo-cemento postensado en construcciones de baja complejidad geométrica». In: Revista de la Construcción Volumen 9 No 2 – 2010 [En ligne]. 1 décembre 2010. Disponible sur : <[www.scielo.cl/pdf/rconst/v9n2/art04.pdf](http://www.scielo.cl/pdf/rconst/v9n2/art04.pdf)> (consulté le 16 avril 2014)

**CASTRO**, J., **NAAMAN**, A. E., 1981.«Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers». In : Journal of the American Concrete Institute, Vol. 78. 69-78p.

**ENOKELA**, O.S., **ALADA**, P.O. (2012) «Strength analysis of coconut fiber stabilized earth for farm structures» [En ligne] In: International Journal of Advancements in Research & Technology, Volume 1, Issue2, Juillet 2012 7p. ISSN 2278-7763 Disponible sur: <<http://www.ijoart.org/docs/STRENGTH-ANALYSIS-OF-COCONUT-FIBER-STABI->

LIZED-EARTH-FOR-FARM-STRUCTURES.pdf>(consulté le 30 juillet 2014)

**GUERRERO** Baca, Luis Fernando. (2011) «Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia». [En ligne] In: Revista Bitacora. No. 22 UNAM. Mexique, 2011 Disponible sur: <<http://www.revistas.unam.mx/index.php/bitacora/article/viewFile/25519/24091>> (consulté le 7 août 2014)

### Rapports de stage

**BROWNE**, Clémentine, (2014). «Rapport de stage TN09. Recherche sur le béton en terre coulée». Auroville Earth Institute. 5 aout 2013 - 17janvier 2014. 59p. (Browne, 2014)

**COCHET**, Jérôme, (2011). «Internship Report. Research and Development Project: Poured Earth». Auroville Earth Institute. INSA de Lyon. Civil Engineering and Town Planning department. Juillet-septembre 2011. 72p.

**COUVREUR**, Lucile. (2012). «Rapport de stage: béton d'argile environnemental». Stage de fin d'études du Département Science et Génie des Matériaux de l'INSA de Lyon. SCOP Caracol Éco-construction. Avril-juillet 2012. 68p. (Couvreur, 2012) (Joris, 2011)

**JORIS**, Neysensas. (2011). «Rapport de stage: béton d'argile environnemental».

Stage de fin d'études du Département Science et Génie des Matériaux de l'INSA de Lyon. SCOP Caracol Éco-construction. Avril-juillet 2012. 20p. (Joris, 2011)

**RONSOUX**, Lionel. (2009) «Béton d'argile SCOP Caracol Stage de septembre à décembre 2009». SCOP Caracol Éco-construction. 7p.

### Article dans des actes de colloque :

**LANGENBACH**, Randolph. (2006). « Preventing Pancake Collapses: Lessons from Earthquake-Resistant Traditional Construction for Modern Buildings of Reinforced Concrete » In : International Disaster Reduction Conference (IDRC), Davos, Switzerland 2006 ICCROM: Integrating traditional knowledge systems and cultural heritage into risk management. 44p.

**MAY**, Gerald W. « Development and utilization of a "poured adobe" building system for seismic areas » In: International workshop earthen buildings in seismic areas. Vol. 2. International workshop held at Albuquerque, New Mexico, May 24-28 1981 Albuquerque : College of Engineering, University of New Mexico, 1981. 519 p.

**MAY**, Gerald W. « Reinforced poured adobe and its applicability to earthquake resistant construction » In: International workshop earthen buildings in seismic areas.

Vol. 2. International workshop held at Albuquerque, New Mexico, May 24-28 1981 Albuquerque : College of Engineering, University of New Mexico, 1981. 519 p.

**SAADI I**, BELOUETTAR, R. (2011). «Comportement mécanique des briques de terre crue renforcées par des fibres de palmier dattier et des fibres de paille ». In: INVACO2 : Séminaire International, INNOVATION & VALORISATION EN GENIE CIVIL & MATERIAUX DE CONSTRUCTION. Rabat, Maroc. 23-25 Novembre 2011. 5p.

### Liste de videos consultés:

**LANGENBACH**, Randolph. (2012) Film: *How a Traditional Technology may prevent Earthquake-Collapse of Modern RC Buildings* [En ligne] [s.l.][s.n.] Disponible sur : <<http://www.youtube.com/watch?v=B57Nn71kbZA>> (consulté le 9 avril 2014) (Langenbach, 2012)

**El Guardian del Habitat** (2014) Film: *Daniel Chávez entrevistando a la Arquitecta Elena Ochoa Directora de CIPTEV en Zapopan, Jalisco*. Enero 2014 [En ligne]. Mexique : [s.n.], février 2014. Disponible sur : <<http://www.youtube.com/watch?v=CDQII22RR44>> (consulté le 15 avril 2014)

**Maxehtercreto, 1** (2010) Film: Sans titre [En ligne]. Mexique : [s.n.], juin 2010. Disponible sur :

<<http://www.youtube.com/watch?v=f8rBkLkSxco>> (consulté le 8 avril 2014)

**Maxehterracreto, 2** (2010) Film: Residencial [En ligne]. Mexique : [s.n.], juin 2010. Disponible sur : <<http://www.youtube.com/watch?v=rbuDH1Ac6Pw>> (consulté le 8 avril 2014)

**Maxehterracreto, 3** (2010) Film: Aplicaciones y acabados [En ligne]. Mexique : [s.n.], juin 2010. Disponible sur : <<http://www.youtube.com/watch?v=ZbfxUgdjmxo>> (consulté le 8 avril 2014)

**Maxehterracreto, 4** (2010) Film: Aplicaciones industriales [En ligne]. Mexique : [s.n.], juin 2010. Disponible sur : <<http://www.youtube.com/watch?v=AVibZFxnROE>> (consulté le 8 avril 2014)

RIVERA Vidal, Amanda, MUÑOZ Catalán, Cristian. (2012) *El Adobe. Manual audiovisual de reforzamiento*. Fundación Jofré Culturas de tierra. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. Fondo Nacional de Desarrollo Cultural y las Artes (FONDART) Gobierno de Chile. Ediciones Cultuvas de Tierra. Santiago de Chile, 2012.

#### Liste de pages web consultés:

**Arch daily.** (2014). *Meet the Artist Behind Those Amazing, Hand-Knitted Playgrounds* [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.archdaily.com/297941/me>

*et-the-artist-behind-those-amazing-hand-knitted-playgrounds/*>(consulté le 9 septembre 2014)

**ARGILUS** (2014) *Béton d'argile*. Chape en terre crue. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.argilus.fr/produit/beton-dargile/>> (consulté le 18 août 2014)

**BCSF.** (2014) *Echelle d'intensite macrosismique*. [En ligne] Le Bureau Central Sismologique Français. France. Disponible sur : <<http://www.franceseisme.fr/ems98.html>> (consulté le 27 août 2014)  
**Be Healthy and Well.** (2012) [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.be-healthyandwell.com/2013/06/coconet-amazing-anti-soil-erosion-net.html>> (consulté le 9 septembre 2014)

**CEA** (2014) *Laboratoire d'études de mécanique sismique (EMSI)* [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www-tamaris.cea.fr/html/fr/notions/echelles.php>> (consulté le 18 août 2014)

**Centre de Recherche Bambou Science & Innovation.** (2014) [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.bambou-science.fr/2011/06/24/caracteristiques-mecaniques-du-bambou/>> (consulté le 11 septembre 2014)

**DREAM BUILDERS.** [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<https://www.youtube.com/watch?v=0>

*j4hGcoLYBc*> (consulté le 18 août 2014)  
**GREEN HOME BUILDING.** Techniques: Poured Earth. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <[http://www.greenhomebuilding.com/poured\\_earth.htm](http://www.greenhomebuilding.com/poured_earth.htm)>(consulté le 18 août 2014)

**EMOTRADE** Emergo-Group. Geosynthétique. Geogrille. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <[http://www.emergo.be/sites/default/files/6.2\\_geogrilles\\_x.pdf](http://www.emergo.be/sites/default/files/6.2_geogrilles_x.pdf)> (consulté le 11 septembre 2014)  
**HORMIGONES VICENTE** (2013). Gaviones de piedra Decorativos. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.hormigonesvicente.com/productos/gaviones-de-piedra-decorativos/>> (consulté le 18 août 2014)

**IRSN.** (2014) Comment mesure-t-on la force des séismes? [En ligne] Institut de Radioprotection et sûreté nucléaire. France 2014. Disponible sur : <[http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/La\\_surete\\_Nucleaire/risque\\_sismique\\_installations\\_nucleaires/Pages/2-Comment\\_mesure-t-on\\_la\\_force\\_des\\_seismes.aspx#.VACbSKMwDAA](http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque_sismique_installations_nucleaires/Pages/2-Comment_mesure-t-on_la_force_des_seismes.aspx#.VACbSKMwDAA)>(consulté le 27 août 2014)

**LE MONITEUR TV.** [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.lemoniteur.fr/181-chantiers/portfolio/873143-cematerre-beton-a-base-de-terre-stabilisee>>(consulté le 18 août 2014)

**LE MONITEUR TV.** (2012) Deux chantiers tests pour un « béton » à base de terre stabilisée. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.lemoniteur.fr/181-chantiers/article/solutions-techniques/873139-deux-chantiers-tests-pour-un-beton-a-base-de-terre-stabilisee>> (consulté le 18 août 2014)

**NELSON,** Lynn S. Development and utilization of a “poured adobe” building system for seismic areas [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://desastres.unanleon.edu.ni/pdf2/2005/diciembre/pdf/eng/doc13311/doc13311-contenido.pdf>> (consulté le 21 mars 2014)

**GSHAP,** (1999). Global Seismic Hazard Map. Global Seismic Hazard Assesment Program [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/>> (consulté le 28 août 2014)  
Holcim Ltd. Holcim Foundation [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.holcimfoundation.org/Projects/secondary-school-with-passive-ventilation-system-gando-burkina>> (consulté le 11 avril 2014) (Holcim Foundation)

**ILCE.** (2013) Biblioteca Digital. Intensidad y magnitud [En ligne] Instituto Latinoamericano de la Comunicacion Educativa. Mexique, 2013. Disponible sur : <[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec\\_10.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec_10.html)> (consulté le 27 août 2014)

**KÉRÉ** Francis. Kéré Architecture. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.kerearchitecture.com/projects/secondary-school-gando/>> (consulté le 11 avril 2014)

**SSN.** (2011) Servicio sismológico Nacional. [En ligne] UNAM, Mexique. Disponible sur : <<http://www.ssn.unam.mx/>> (consulté le 27 août 2014)

**Marcelo Cortés** Arquitecto. (2012) [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <[http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto\\_descripcion.php?id=207](http://www.marcelocortes.cl/proyectos/proyecto_descripcion.php?id=207)> (consulté le 9 septembre 2014)  
MAXEH Internacional de México SA. de CV. Maxeh Terracreto. Aditivo para la construcción con suelo cemento fluido. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.maxeh.net/>> (consulté le 4 avril 2014)

**LANGENBACH,** Randolph, (2007). Traditional is Modern. Vernacular Architecture and Traditional Construction around the World [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.traditional-is-modern.net>> (consulté le 9 avril 2014)

**PATENT US4365451 A** . Google Patents. Poured adobe building construction and method of forming same. Patent publication number US4365451 A [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<https://www.google.com/patents/US4365451>> (consulté le 21 mars 2014)

**TRIPADVISOR.** (2014) Saint Omer Photo [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <[http://www.tripadvisor.com/Location-PhotoDirectLink-g562728-i102619880-Saint\\_Omer\\_Pas\\_de\\_Calais\\_Nord\\_Pas\\_de\\_Calais.html#102532134](http://www.tripadvisor.com/Location-PhotoDirectLink-g562728-i102619880-Saint_Omer_Pas_de_Calais_Nord_Pas_de_Calais.html#102532134)> (consulté le 11 août 2014)

**WEBSTER,** F. A. Reinforced poured adobe and its applicability to earthquake resistant construction. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.eird.org/cd/building-codes/pdf/eng/doc13328/doc13328-contenido.pdf>> (consulté le 11 avril 2014)

**1u1v CUHK.** (2013) Post-earthquake Reconstruction and Demonstration Project in Ma'anqiao Village. [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <<http://www.flickr.com/photos/111725040@N03/11431890085/in/photostream/>> (consulté le 13 mars 2014)

**Pics&Fotos.** (2014) 3d wire mesh panel china 3d wire mesh panel products [En ligne] [s.n.] [s.l.] Disponible sur : <[http://3d-pictures.picphotos.net/3d-wire-mesh-panel-china-3d-wire-mesh-panel-products/twfta.com\\*datas\\*products\\*7\\*2\\*4\\*724f648b1aca4254083ed1cb46035b25\\*products\\*photos\\*1285583793picupload.jpg.jpg/](http://3d-pictures.picphotos.net/3d-wire-mesh-panel-china-3d-wire-mesh-panel-products/twfta.com*datas*products*7*2*4*724f648b1aca4254083ed1cb46035b25*products*photos*1285583793picupload.jpg.jpg/)> (consulté le 9 septembre 2014)

# Glossaire des techniques constructives en terre

Le «Traité de construction en terre» classifie les modes d'utilisation de la terre dans la construction de la façon suivante :

- Structure porteuse avec remplissage en terre.
- Les blocs de terre crue maçonnés.
- Éléments monolithique en terre.

Le pisé, l'adobe (briques de terre crue), le torchis et le BTC sont les plus connues.

Les différents modes d'utilisation sont brièvement décrits dans la fig. 1 et ses définitions. (Houben, Guillaud, 2006)

Dans ce mémoire, on s'intéresse à la terre coulée : «la terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton»( Ibid, 162p). Cette technique est la même que celle utilisée pour le béton conventionnel. Elle permet de réaliser de éléments constructifs in-situ. Le coffrage est placé à l'emplacement final de l'élément à construire. Chaque fois que le terme terre coulée est employé, je fait référence à cette technique constructif ou au matériau à base

de terre utilisé dans cette technique. Les termes suivants font également référence aux mêmes techniques constructives : béton de terre, béton d'argile, poured earth, cast earth, tierra vertida, tierra colada, barro colado, hormigón de tierra estabilizada (HTE).

Néanmoins les terme béton de terre et béton d'argile sont de termes génériques. Dans ce concept, la terre est considérée comme un «véritable béton d'argile», dans le sens que ce sont les argiles qui agglutinent les grains d'une terre; au même titre que le ciment liaisonne les grains dans le béton conventionnel. Le mot béton est compris comme un matériau composite fabriqué à partir de granulats agglomérés par un liant (Couvreur, 2012, 9p.). Dans ce concept, la technique de mise en œuvre ne fait pas référence au même terme. La terre à piser, le matériau pour faire des briques de terre crue, la terre allégée et la terre

coulée sont nommés «béton de terre» ou «béton d'argile». Il y a des auteurs qui utilise ce concept dans la langue française utilisent longtemps.

Il faut mentionner également que le termes en anglais "poured earth" et "cast earth" font références à la même technique constructive, la terre coulée. Mais ils sont différents dans le sens que "cast earth" dans sa connotation de matériau à couler a comme composant du plâtre, et la "poured earth" non.

Par la suite dans ce mémoire, je fais référence au béton conventionnel (composé de ciment) uniquement avec le mot "béton". Toute autre type de béton sera spécifié.

# Glossaire des techniques constructives en terre

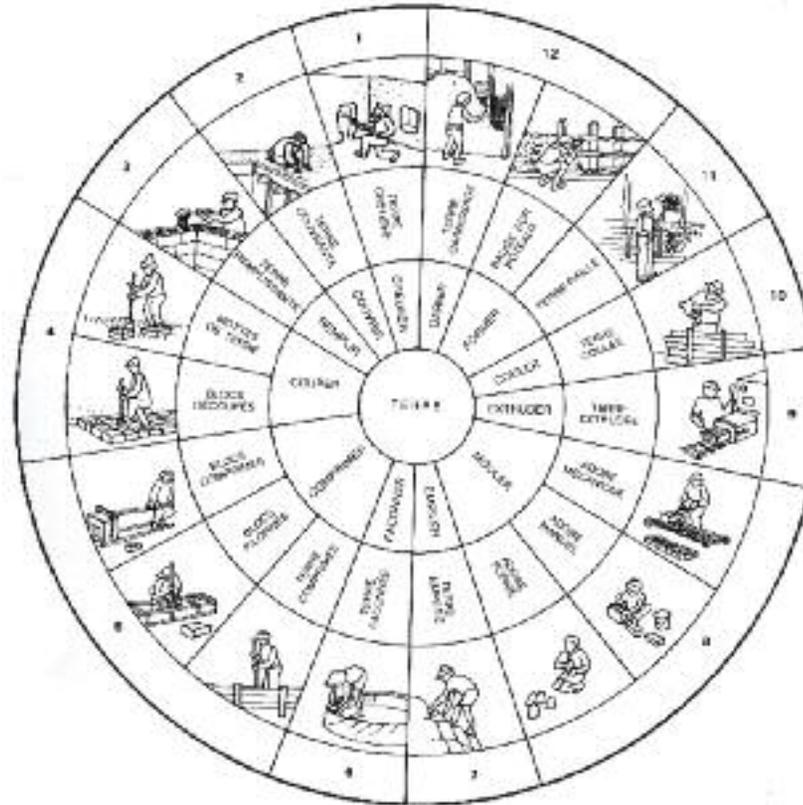


Fig. 240 Modes d'utilisation de la terre selon le Traité de construction. (Houben, Guillaud, 2006)

- 1 TERRE CREUSÉE: l'habitation est creusée dans l'épaisseur de l'écorce terrestre: habitat troglodytique.
  - 2 TERRE RECOUVRANTE: la terre recouvre une structure construite avec un autre matériau.
  - 3 TERRE REMPLISSANTE: la terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe.
  - 4 TERRE DÉCOUPÉE: des blocs de terre sont directement découpés dans la masse du sol.
  - 5 TERRE COMPRIMÉE: des éléments sont réalisées avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.
  - 6 TERRE FAÇONNÉE: la terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces.
  - 7 TERRE EMPILÉE: des boules de terre sont empilées pour reconstituer des murs épais.
  - 8 TERRE MOULÉE: la terre est moulée ou à l'aide des moules (formes diverses).
  - 9 TERRE EXTRUDÉE: la terre est extrudée par une puissante machine.
  - 10 TERRE COULÉE: la terre est coulée dans des coffrages ou dans des moles comme un béton.
  - 11 TERRE-PAILLE: une barbotine argileuses lie des fibres et constitue un matériau léger.
  - 12 TERRE GARNISSANTE: la terre mêlée de fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support.
- (Houben, Guillaud, 2006)

# **Annexe 1 :**

# **La conception parasismique**

«Les tremblements de terre ont souvent été meurtriers. [Ils] ne sont pas un phénomène rare. Tous les ans se produit sur notre globe en moyenne vingt séismes violents. Heureusement, ils ne touchent pas tous des zones peuplées. En France le dernier séisme destructeur, ..., est survenu en 1909 à Lambesc, à 20 km d'Aix-en-Provence. La période de retour des séismes destructeurs (intensité supérieure à VII) en France est estimée à 100-150 ans environ.»(Zacek, 1996, 11p.) Une simulation des effets d'un séisme de la même intensité réalisé en 1982 sur ce même site, estime les dégâts engendrés à un millier de morts, 450 bâtiments entièrement détruits et 21 850 bâtiments endommagés. Les tremblements de terre sont une réalité à laquelle des millions de gens doivent faire face. (Zacek, 1996) La fig. 241 montre les degrés de sismicité des différentes régions du monde. Selon la théorie de la tectonique des plaques, la lithosphère se compose de plaques rigides qui flottent dans l'asthénosphère, un milieu magmatique. Il existe différents modèles, qui proposent un nombre variable de plaques principales, qui va de six à quinze, et plusieurs plaques secondaires. Les plaques s'écartent, s'affrontent ou coulissent horizontalement l'une par rapport à l'autre. Ces mouvements relatifs sont de l'ordre de 1 à 15 centimètres par an. «Les collisions et les distensions des plaques produisent des tensions très importantes dans les roches comprimées, étirées ou cisailées.

La matière des roches tend à se libérer de ses tensions. Lorsqu'elle y arrive, au pris d'une rupture soudaine du massif rocheux, cette libération est brutale. La terre se met à trembler et ses vibrations se propagent à travers le globe, [jusqu'à] 500km ou plus pour les séismes les plus violents.» (Zacek, 1996, 21p.) Ces vibrations font bouger le sol avec des déplacements, une vitesse, une accélération, une période, une fréquence et amplitude spécifique dans chaque endroit où il est ressenti. Il y a deux catégories de mesures des séismes, la magnitude et l'intensité. C'est la magnitude qui mesure l'énergie libérée par la source d'un séisme. Il existe plusieurs types de magnitudes et méthodes de calcul pour la magnitude d'un séisme, chaque méthode demande des données différentes. Chaque agence sismologique fait ses calculs et les publie. La magnitude d'un même séisme peut être légèrement différente selon la méthode de calcul utilisée et selon l'agence. Les méthodes sont liées à des échelles sismiques différentes. L'échelle la plus utilisée est la magnitude de moment ( $M_w$ ) qui substitue l'échelle de Richter ( $M_L$ , qui est un autre type de magnitude). Les médias continuent à parler de l'échelle de Richter, qui mesure comme maximum une magnitude de 6,9 et en stricto sensu, qui est seulement adaptée aux séismes californiens. Au Japon, Chine et Corée on utilise l'échelle «Shindo» ou «JMA».

L'intensité mesure des effets observés ou les dommages causés par un séisme. Au Japon on utilise l'échelle «Shindo». En Chine l'échelle «Liedu» ou «CSIS». En Amérique l'échelle de Mercalli modifiée ou «MM». En Inde la «MSK 1964», qui a été utilisée en Europe jusqu'à l'année 1998. De nos jours, en France et en Europe on utilise l'échelle «EMS 98». L'échelle ESI 2007 mesure les effets d'un séisme dans un milieu naturel. Les échelles mentionnées sont les plus utilisées, toutefois, il existe une quarantaine d'échelles d'intensité, adaptées aux besoins spécifiques des différents pays concernés par les séismes. La fig. 242 montre l'équivalence des trois échelles d'intensité et leur équivalent en accélération du sol. La fig. 243 montre les effets macrosismiques selon l'échelle MSK 1964. Dans les constructions en adobe et en pisé les premières fissures dans les murs sont observées à partir d'une intensité VI, c'est à dire, une accélération du sol de 0,06 g. Et on observe un effondrement partiel ou total au niveau VII, donc une accélération de 0,25 g. Ces indications reflètent le constat au cours des années après différentes séismes dans différents endroits. Ça ne veut pas dire que c'est la règle pour toutes les constructions en terre. On trouve de nombreuses constructions historiques en terre, bien conçues et bien construites qui ont supporté de nombreux séismes. Un exemple est la «Maison Broadgreen» en Nouvelle Zélande, voir page X pour plus d'information.

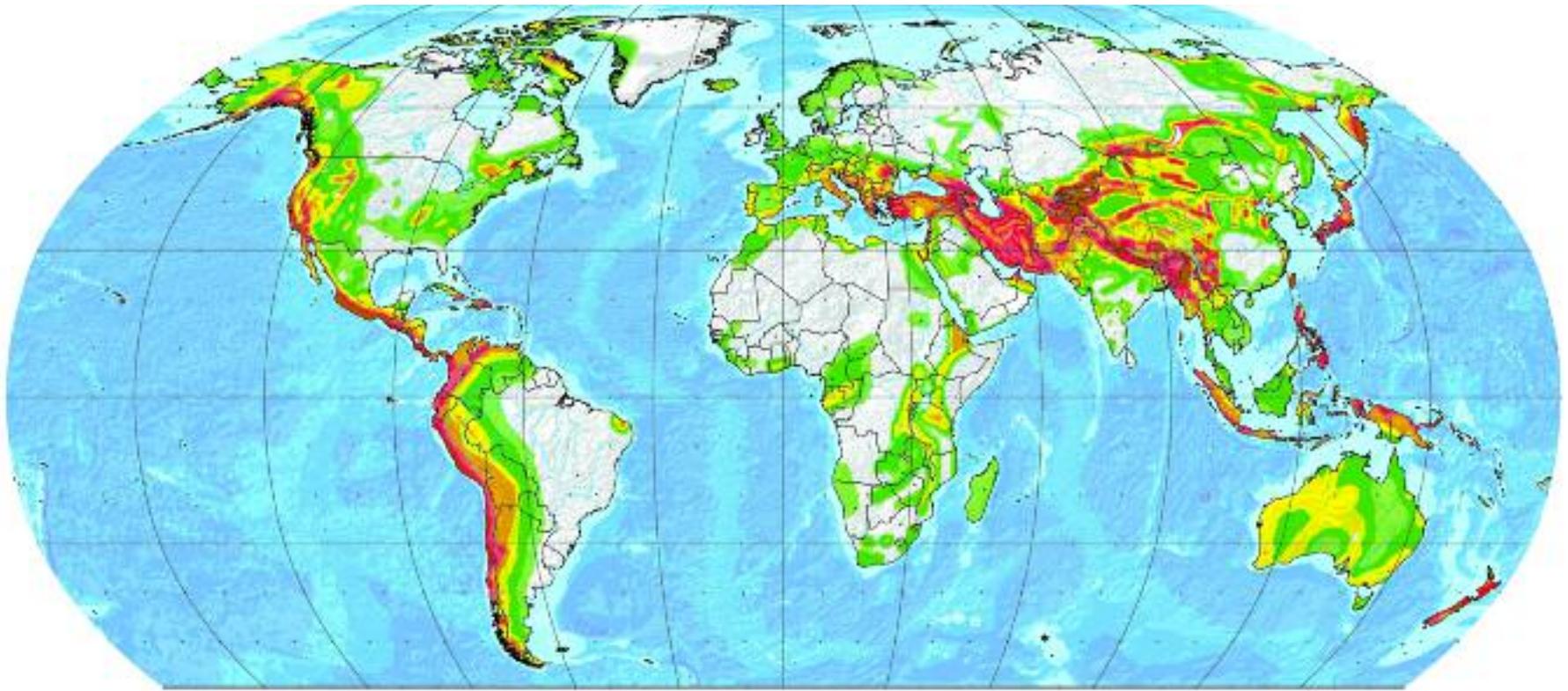


Fig. 241 Global Seismic Hazard Map (GSHAP, 1999)



<b>MSK 1964</b>	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>MERCALLI (MM)</b>	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>SHINDO</b>	0	I	II	III	IV	V	VI	VII				
accélération maximale moyenne du sol en g	0,002	0,004	0,008	0,015	0,03	0,06	0,13	0,025	0,50	1	2	4

Fig. 242 Comparaison des différentes échelles d'intensité et leur équivalent en accélération du sol. (Zacek, 1996)

INTENSITÉ	EFFET MACROSISMQUES		
	MAISOINS EN PISÉ, BRIQUES CRUES OU EN PIERRE NON TAILLÉE	CONSTRUCTIONS EN BRIQUES, BLOCS DE BÉTON, PIERRE TAILLÉE OU CONSTRUCTIONS MIXTES MAÇONNERIE / BOIS	CONSTRUCTIONS ARMÉES ET CONSTRUCTIONS DE QUALITÉ EN BOIS
I	secousse non perçue par l'homme		
II	secousse à peine perceptibles, ressentie par peu de personnes, généralement aux étages		
III	secousse faible, ressenti par quelques personnes; léger balancement des objets suspendus		
IV	secousse largement ressentie; vibration des portes et des fenêtres; craquements des planchers et des murs; secousses du mobilier		
V	réveil des dormeurs; agitation des animaux; chute de tableaux et renversement d'objets; projection des liquides		
VI	fissuration de murs; chute de tuiles et de parties de cheminées	fissuration des plâtres; chute de petits débris	frayeur; bris de verres et d'assiettes; déplacement de mobilier lourd
VII	brèches dans les murs; effondrements partiels; destruction de remplissages et de cloisons	fissuration de murs; chute de tuiles et de parties de cheminées	fissuration des plâtres; chute de petits débris
VIII	effondrement partiel ou total	brèches dans les murs; effondrements partiels; destruction de remplissages et de cloisons	fissuration de murs; chute de tuiles et de parties de cheminées; renversement de mobilier lourd
IX	effondrement total	effondrement partiel ou total	brèches dans les murs; effondrements partiels; destruction de remplissages et de cloisons
X	effondrement total		effondrement partiel ou quelquefois total
XI	effondrement total		effondrement quasi total
XII	effondrement total		

Fig. 243 Échelle d'intensité macrosismique MSK 1964 (présentation simplifiée). (Zacek, 1996)

La Commission européenne de sismologie a développé l'échelle EMS 98. Le Tableau de classes de vulnérabilité des bâtiments, fig. 244, fait partie de l'échelle, où le terme "vulnérabilité" est utilisé pour exprimer les différences de réaction des bâtiments aux secousses sismiques. «Si deux groupes de bâtiments sont soumis exactement à la même secousse sismique et que l'un des groupes se comporte mieux que l'autre, alors on dira que les bâtiments qui ont été le moins endommagés avaient une vulnérabilité plus faible aux tremblements de terre que ceux qui ont été plus endommagés; on peut aussi déclarer que les bâtiments qui ont été moins endommagés étaient plus résistantes aux tremblements de terre et vice-versa.» (Grünthal, 2001, 18p) Six classes de vulnérabilité décroissante (A-F) sont proposées. Les trois premières sont représentatives de la résistance d'une maison «typique» en briques crues, d'un bâtiment de briques cuites et d'une structure en béton armé. Les classes D-F représentent la réduction linéaire de la vulnérabilité en fonction du degré de conception parasismique (CPS). La classe F est destinée aux structures ayant le meilleur degré de résistance aux séismes grâce aux principes de conception pris en compte. Il n'y a pas d'études qui montre le degré

### Différentiation des bâtiments en classe de vulnérabilité

Type de structure	Classe de vulnérabilité					
	A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○				
	Brique crue (adobe)	○—				
	Pierre brute	—○				
	Pierre massive		—○—			
	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués	—○—				
	Non renforcée, avec des planchers en béton armée		—○—			
	Renforcée ou chaînée			—○—		
BÉTON ARMÉE	Ossature sans conception parasismique (CPS)		—○—			
	Ossature avec un niveau moyen de CPS			—○—		
	Ossature avec un bon niveau de CPS				—○—	
	Murs sans CPS		—○—			
	Murs avec un niveau moyen de CPS			—○—		
	Murs avec un bon niveau de CPS				—○—	
ACIER	Structures en charpente métallique			—○—		
BOIS	Structures en bois de charpente		—○—			

○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;  
 --- Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels.

Fig. 244 Classe de vulnérabilité des bâtiments selon l'échelle EMS 98. La vulnérabilité est décroissant de A à F. (Grünthal, 2001, 14p)

de réduction de vulnérabilité des constructions en terre conçu avec un bon niveau de CPS. Néanmoins, dans le chapitre suivant, plusieurs projets nous montrent comment les armatures dans la masse de murs peuvent faire résister des constructions en terre aux séismes. La réglementation dans plusieurs pays qui souffrent des secousses sismiques permet de construire des maisons et bâtiments de deux étages.

### Les contraintes dynamiques

À tout moment les constructions ont des contraintes statiques imposées par la pesanteur. Au moment d'un séisme, celui-ci impose aux constructions des contraintes dynamiques: horizontales, verticales et de torsion. Les bâtiments doivent faire face à un changement soudain des forces qui agissent sur eux. D'un seul coup, des forces de traction, de moment, de flexion et cisaillement sollicitent les constructions. Les dessins de la fig. 245 montrent de manière exagérée, les mouvements que la masse d'un mur a tendance à suivre face aux différentes forces.

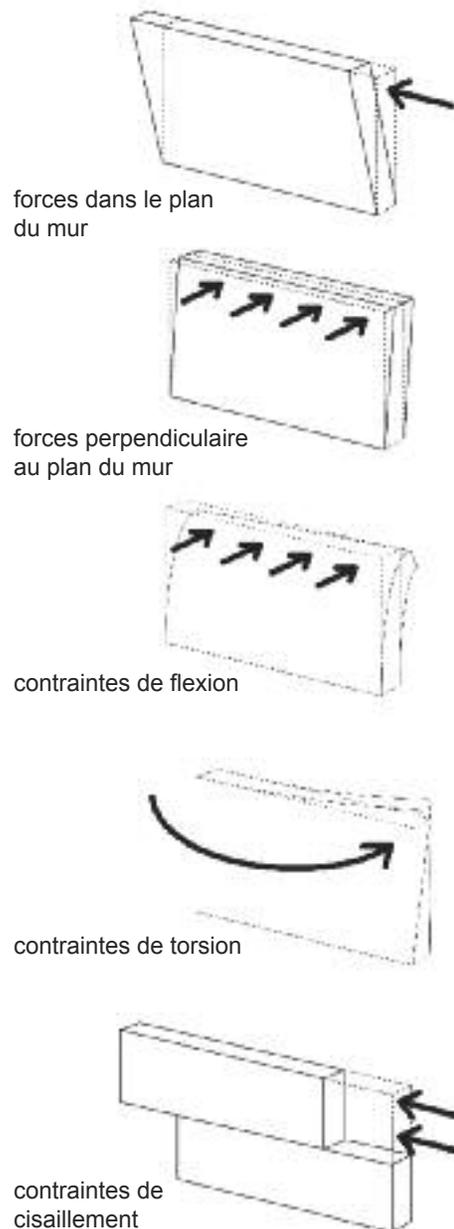


Fig. 245 Schématisation des différentes forces qui agissent sur les constructions pendant un séisme. (AFPS, 2003)

Le Getty Conservation Institute a commencé en 1990 un projet de recherche (Getty Seismic Adobe Project ou GSAP) pour comprendre le comportement de structures d'adobe lors de séismes. Après le séisme de Northridge, d'une magnitude de 6,4, l'Institut a enregistré les dommages que les bâtiments historiques en adobe de la région de Los Angeles ont présentés. La fig. 247 montre la typologie des dommages causés suite au travail de l'Institut. Des dessins du projet NIKER des constructions en adobe, pisé et bauge sont aussi présentés dans cette figure. Par la suite, je commente les effets observés sur des constructions en terre non armée. Les forces horizontales dans le plan du mur provoquent des contraintes de cisaillement dans la paroi. Du fait du manque de résistance de traction des murs, des fissures diagonales (de près de 45°) apparaissent dans un sens ou l'autre du mur selon la direction des forces. Quand les forces sont dans les deux sens, deux fissures formant une croix se présentent (fig. 246). Ce type de fissures se trouve suivant entre les ouvertures des murs: fenêtres et les linteaux des portes; cela est dû à la concentration des efforts dans ces endroits, voir dessins C et D de la fig. 247.

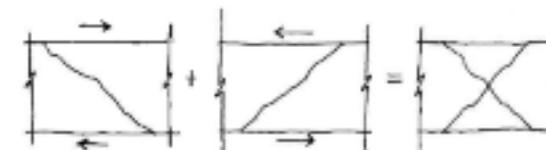
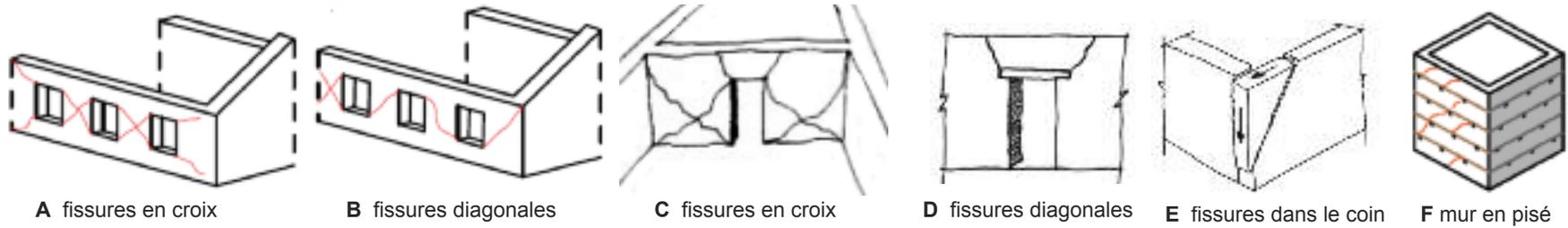


Fig. 246 Fissures en forme de croix qui résultent de la combinaison des forces dans les deux directions dans le plan du mur. (Leroy, 1996)

## Typologie de dommages causés aux constructions en terre non armées par les secousses sismiques

### forces dans le plan du mur



### forces perpendiculaire au plan du mur

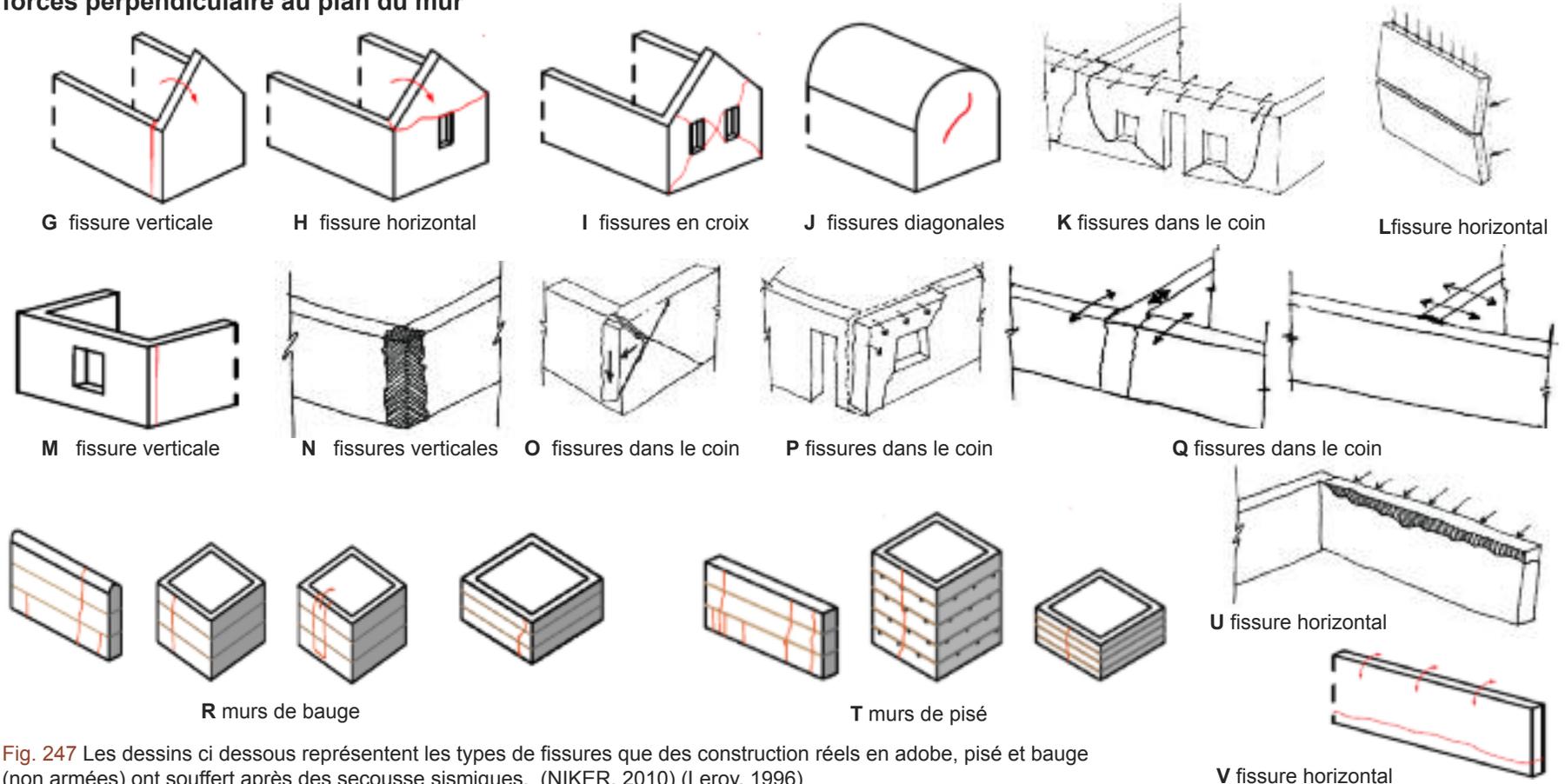


Fig. 247 Les dessins ci-dessous représentent les types de fissures que des constructions réelles en adobe, pisé et bauge (non armées) ont souffert après des secousses sismiques. (NIKER, 2010) (Leroy, 1996)

Un mur qui n'est pas fixé à la toiture, ou à un système de plancher, ou à un mur de clôture, est beaucoup plus susceptible d'avoir de dommages dus aux forces perpendiculaires au plan du mur. Ces forces peuvent faire qu'un mur pignon se sépare d'un angle ou de deux, ou se déverse complètement au sol (dessins G et H, fig. 247). Ils font apparaître des fissures dues aux contraintes de flexion, qui se présentent en premier pendant un séisme (dessins I, J et K, fig. 247). Si l'élanement d'un mur est élevé, des fissures horizontales à mi-hauteur peuvent surgir (dessin L, fig. 247). Les angles d'une construction en terre, reçoivent une concentration d'efforts qui les rendent spécialement vulnérables. Des forces de cisaillement dans le plan du mur peuvent causer des fissures verticales et diagonales qui séparent complètement l'angle du reste du mur (dessin E, fig. 247). Les fissures verticales apparaissent face aux forces de flexion et traction causées par des mouvements sismiques perpendiculaires au plan du mur. Si les fissures apparaissent sur les deux murs de l'angle, celui-ci peut s'effondrer (dessin N, fig. 247). La combinaison des fissures verticales et diagonales dans un coin augmente le risque d'effondrement (dessin O, fig. 247). Les fissures dans les angles laissent les murs libres de bouger de manière indépendante entre eux, ce qui réduit la stabilité de la construction et augmente le risque d'effondrement total. Si les ouvertures sont près des angles, cette section de la construction devient plus faible et sujette aux

dommages et à l'effondrement (dessin P, fig. 247).

Un dommage très commun est la séparation des murs perpendiculaires. L'interaction des forces dans le plan et perpendiculaire au plan du mur interagissent et séparent les murs entre eux : un mur bouge pendant que l'autre reste sur place et des fissures se créent (dessins Q, fig. 247).

La typologie de dommages présentée montre d'un côté, les caractéristiques mécaniques propres de la terre comme matériau de construction: une résistance presque nulle en traction, donc une faible résistance au cisaillement; et une résistance en flexion très réduite, entraînant une faible résistance en torsion. Cette typologie de dommage n'est pas représentative du comportement dynamique de toutes les constructions en terre. Il s'agit du comportement qui a été observé surtout des constructions historiques en adobes de la région de Los Angeles, comme je l'ai déjà mentionné. Il correspond au critère de conception et construction de cette zone là. Néanmoins, cette typologie est représentative de la tendance du comportement dynamique qu'une construction en terre peut suivre. Il y a des exemples et des endroits où d'autres critères constructifs sont appliqués pour donner aux constructions en terre un comportement adéquat face aux séismes. C'est la manière dont les matériaux sont disposés entre eux, l'action conjointe de tous les éléments constructifs, la configuration et la conception d'une con-

struction et de ses détails constructifs, et la qualité de la main d'œuvre, qui va donner à une structure un comportement dynamique adéquat face aux séismes (INTERTECT, 1994), sans oublier les caractéristiques intrinsèques du matériau qu'on utilise pour construire. Tous les aspects à prendre en compte pour le bon comportement d'une construction, font l'objet du corpus d'une conception parasismique (CPS). Le tableau de vulnérabilité des bâtiments présenté dans la page 114 montre que le degré de CPS qui fait réduire la vulnérabilité d'une construction en béton armé est non seulement le matériau per se.

Un contre-exemple de la typologie de dommages présentée est la «Maison Broadgreen» construite en 1850 près de Nelson dans le sud de Nouvelle Zélande. C'est une construction des deux étages construite avec des murs en bauge non armée qui a résisté aux trois séismes majeurs d'une intensité MM de VII ou plus. Les murs du premier étage, de 50 cm d'épaisseur, ont un élanement de 5,4. Cette maison est conçue et construite d'une façon qui la fait résister (fig. 248).



Fig. 248 «Maison Broadgreen» qui a supporté trois séismes majeurs. (Morris)

# Les principes de conception parasismique

L'objectif d'une construction parasismique est d'avoir un comportement dynamique adéquat pour faire faces aux forces horizontales et de torsion que les séismes engendrent. L'objectif est de minimiser les risques d'effondrement de la structure, et minimiser ainsi, les risques de pertes de vies humaines. Il n'y a pas de constructions anti-sismiques, puisqu'il aura toujours un séisme d'une magnitude suffisante pour pouvoir les détruire. Heureusement les séismes très destructeurs sont exceptionnels et peut fréquents, avec de longues périodes de retour à l'échelle de la vie humaine. Dans les endroits où la fréquence des séismes d'une intensité importante ( MM ou MSK VIII à X) a été de l'ordre de quarante à soixante années, des cultures parasismiques locales sont nées pour donner des solutions satisfaisantes au comportement dynamique des constructions dans ces endroits (Ferrigni, 2005). Selon Ferrigni, des cultures parasismiques locales se sont développées selon deux méthodes et trois approches. Une méthode pour "capturer de l'énergie" : on construit avec des matériaux qui ont un très fort potentiel de friction inhérent, qui contrebalance les effets des forces horizontales et de torsion en rigidifiant les angles de la construction. Et une méthode qui "métabolise", au lieu de contrebalancer les efforts : les déformations contrôlées de l'ensemble de la structure, de certaines

zones ou de liaisons particulières, suivent les forces de horizontales et de torsion. Les constructions acceptent les déplacements. La première méthode est l'approche rigide. Les constructions sont plus rigides, elles évitent le mouvement. L'énergie qu'elles reçoivent est métabolisée suite à l'augmentation des tensions dans les éléments de la structure.

La deuxième méthode est l'approche flexible. Les constructions métabolisent les forces à travers des déformations élastiques de la structure complète ou de quelques éléments.

La troisième approche, exposée par Ferrigni est l'approche passive sous laquelle la destruction des construction sous l'effet d'un séisme est simplement acceptée. Par conséquent il est inutile de chercher à augmenter la rigidité ou flexibilité des constructions.

Les cultures constructives parasismiques peuvent élargir notre compréhension sur l'interaction des matériaux locaux qui donnent des constructions avec un comportement dynamique acceptable sous les effets sismiques. Elles peuvent nous donner des pistes et des connaissances pour développer des systèmes constructifs écologiques, de base énergie grise, faites avec des matériaux locaux.

Le génie parasismique se développe depuis les années soixante tant aux États Unit qu'au Japon (Zacek, 1996). Au cours des années le cumul des connaissances a grandi et évolué, vers une meilleure compréhension scientifique des phénomènes physiques dans la dynamique des constructions, une compréhension plus approfondie des phénomènes géologiques et sismiques ; et d'une manière similaire que la naissance des cultures constructives parasismiques, par des essais et erreurs, c'est à dire par l'accumulation des expériences et la vérification des théories et des méthodes. Le corpus des connaissances du génie parasismique se concentre sur les matériaux industriels comme l'acier et le béton armé, et d'une manière plus restreinte au bois. La terre, le bambou, la pierre et autres matériaux locaux ont été laissés de côté. Quelques recherches se font autour des matériaux locaux, mais la distance est encore grande pour pouvoir les intégrer dans nos dynamiques sociales. Les cultures constructives parasismiques et les connaissances collectées pour le génie parasismiques sont indispensables pour développer des systèmes constructifs avec des matériaux locaux, associés à une énergie grise faible, voire nulle.

## Équilibre dynamique

Les constructions ont une tendance à conserver leur immobilité, qui s'exprime en forces d'inertie qui agissent dans le sens opposé aux mouvements du sol pendant un séisme. «Plus la construction est lourde, plus sa résistance au mouvement est grande et plus grandes sont les forces d'inertie qu'elle subit». (Zacek, 1996, 73p) Les forces vibratoires des séismes font bouger cycliquement les constructions. Une fois que le séisme est passé, les oscillations des constructions continuent jusqu'à leur amortissement complet. Les déplacements imposés par les oscillations font que les constructions se déforment. Les déformations stockent et dissipent de l'énergie. Les forces dues à l'élasticité de la structure (forces de rappel), la ramènent à la position non déformée. Lorsque la capacité de la construction à stocker et à dissiper l'énergie est égale à la quantité d'énergie des forces d'inertie, la construction est en équilibre dynamique. Quand la structure n'arrive plus à tolérer les déformations imposées par les secousses sismiques, la rupture de cette dernière se produit, et l'équilibre se perd. La rupture peut être fragile, comme dans le cas de constructions en terre ou elle peut être ductile, quand la structure présente des déformations plastiques.

Les éléments constructifs stockent l'énergie en fonction des matériaux qui les constituent, de leur forme et de leurs dimensions. Dans le cas d'une structure rigide, la

capacité à stocker l'énergie s'incrémente avec l'augmentation de la section transversale des éléments porteurs. Un mur double sa capacité à stocker l'énergie si on double son épaisseur. La capacité des éléments à stocker l'énergie peut être compromise par leur flambement, déversement et voilement. Et la capacité de stockage d'énergie d'une structure dépend de ses éléments, de la nature et du nombre de liaisons qui les relie (Zacek, 1996).

Minke (Minke, 2001) explique l'équilibre dynamique comme une relation inversement proportionnelle entre la résistance mécanique et la ductilité des éléments constructifs. Plus une structure est résistante mécaniquement (plus elle s'oppose aux mouvements), moins de ductilité est nécessaire. Plus la résistance mécanique est faible, plus une ductilité élevée est nécessaire.

«Pour favoriser la résistance d'une construction aux séismes, on peut:

- minimiser l'action sismique, c'est-à-dire les forces d'inertie auxquelles elle sera soumise et l'énergie qui lui sera communiquée par les secousses;
- maximiser la capacité de réaction de la construction aux séismes: accroître leur résistance mécanique; et accroître leur capacité à stocker ainsi qu'à dissiper l'énergie.» (Zacek, 1996, 74p)

## Les forces d'inertie

Zacek explique que dans le cas hypothétique d'un immeuble de poids nul, celui-ci pourrait suivre les mouvements sismiques du sol sans aucun dommage. C'est la masse de la construction, son poids propre qui est en relation directe avec les forces d'inertie que la structure va suivre pendant un séisme. Si la construction est plus lourde, plus grandes seront les forces d'inertie ( $f_i$ ), qui sont proportionnelles à la masse de la construction et à l'accélération que les séismes imposent aux structures. Les forces qui agissent horizontalement sur un bâtiment s'exprime ainsi:  $f_i = m \cdot a$  Les accélérations des mouvements sismiques s'expriment en fractions de la pesanteur ( $g$ ), qui varie légèrement d'un endroit à l'autre. En Europe centrale, elle est de 9,81 m/s<sup>2</sup>. Un séisme avec une accélération de 0,3 g implique que 30% du poids propre de la construction agit horizontalement sur elle même. (Minke, 2001) L'accélération transmise par le sol est plus ou moins amplifiée par l'élasticité des constructions. Néanmoins, les forces d'inertie ne sont pas les mêmes pour tous les éléments constructifs.

Chaque type de sol et chaque construction ont une période de vibration propre face aux vibrations sismiques. Les sols meubles (alluvions et sédiments peu consolidés) transmettent principalement des basses fréquences (oscillation de longue période). Les sols durs ont surtout une période courte. Les constructions peuvent soit am-

plifier ou atténuer les accélérations. Sa réponse dépend entièrement de leur conception. Une conception architecturale intrinsèquement parasismique permet de minimiser ou même supprimer l'amplification des accélérations par la construction. Les constructions flexibles ont des périodes longues, tandis que les constructions rigides ont des périodes courtes. Les constructions enterrées n'amplifient pas les accélérations. La période propre d'une construction varie en fonction de sa rigidité, sa hauteur et ses dimensions horizontales. Les maisons et bâtiments en terre crue, en pierre, en briques cuites et en parpaings béton sont des constructions rigides avec une période propre d'entre 0,1 et 0,6s. Ils amplifient considérablement les accélérations qui leur sont transmises par le sol, et subissent des charges sismiques relativement importantes. Si la période du bâtiment est la même ou très proche de la période de sol, celui-ci peut entrer en résonance avec le sol et amplifier considérablement les accélérations, ce phénomène entraînant des dommages graves sur les structures. (Zacek, 1996)

Les «moyens de minimiser les accélérations auxquelles les constructions pourraient être soumises:

- Construire sur des terrains qui ne donnent pas lieu à une amplification locale importante des secousses sismiques.
- Opter pour des structures dont la période d'oscillation est aussi différente que possible de la période dominante du sol d'as-

sisé.

- Opter pour des constructions de faible hauteur ou enterrées.
- Répartir les masses symétriquement par rapport au centre géométrique de chaque niveau ; placer les masses importantes de préférence aux étages inférieurs.
- Concevoir des bâtiments possédant un amortissement élevé. Il est important de noter que la réduction des accélérations est très grande lors de la dissipation d'énergie à travers les déformations irréversibles des constructions.
- Concevoir des bâtiments de forme simple et symétrique, dont la structure porteuse est régulière et contreventée symétriquement. Ceci permet de limiter les amplifications des accélérations dues à la torsion d'ensemble...» (Zacek, 1996, 80p.)

### Dissiper de l'énergie

Il y a quatre catégories des mécanismes pour dissiper l'énergie:

- Réflexion vers le milieu environnant  
Il y a une dissipation d'énergie en fonction de la profondeur des fondations, de la masse d'une construction, et de la déformabilité du sol. Cette dissipation est déterminée par une étude d'interaction entre le sol et la structure.
- Frottement externe  
Une source significative de dissipation d'énergie est le frottement dans les joints aux interfaces de contact entre différents

matériaux.

- Fissuration et rupture d'éléments constructifs

La fissuration ou la rupture d'un élément constructif engendre de la perte d'énergie, c'est-à-dire de la dissipation d'énergie. Il est possible de prévoir des éléments «fusibles», prévues pour se rompre au-delà d'un seuil d'accélération, sans compromettre la stabilité de la structure.

- Amortissement interne

La cause la plus importante de la dissipation d'énergie est l'amortissement interne. Il entraîne un retard des déformations sur l'action des charges. Il est dû à la viscosité, l'anélasticité et plasticité des matériaux. «Les déformations plastiques absorbent une importante quantité d'énergie et produisent une relaxation des contraintes. Leur apparition réduit par ailleurs la vitesse d'oscillation et entraîne un allongement de la période propre de la construction, ce qui est en générale favorable.» (Zacek, 1996, 87p.) Les déformations irréversibles localisées au cours des séismes exceptionnels sont admis par les règles parasismiques dans plusieurs pays. Certains éléments constructifs sont spécialement enclins à suivre ces déformations plastiques. Il se pratique également l'installation de dispositifs d'amortissement. Les principaux sont les amortisseurs hystérétiques, visqueux et à frottement. (Zacek, 1996)

## Les recommandations de conception

- Faire un choix judicieux du site de construction;
- Dans le cas d'une construction à côté d'un bâtiment existant, laisser une séparation (joint de dilatation, 4cm mini à Grenoble par ex.) entre les deux bâtiments, pour éviter des collisions entre les deux;

### L'ensemble

- Forme du plan de bâtiment simple, symétrique et compact;
- Un rapport largeur-longueur du bâtiment maximum de 1:3;
- Éviter les angles rentrants. Configurer avec des formes simples structurellement indépendantes des configurations plus complexes de bâtiments;
- Faire une variation progressive des dimensions. Par exemple composer deux dimensions différentes du bâtiment avec deux volumes structurellement indépendants;
- Faire coïncider le centre de rigidité et centre de gravité;
- Assurer que le centre de gravité de la construction soit le plus bas possible;
- Assurer une distribution correcte de charges au sein de la structure;
- Concevoir des systèmes porteurs dont les masses, les résistances et les rigid-

- ités horizontales soient uniformément réparties, tant en plan qu'en hauteur dans les deux directions;
- Conférer une rigidité comparable aux éléments ayant une même fonction structurelle;
- Assurer une continuité mécanique entre les éléments de la structure et lors de changements de direction;

### Fondations

- Concevoir des fondations qui supportent bien le poids de la construction et qui maintiennent sa rigidité pendant les secousses sismiques.

### Murs

- Trois choix structurels possibles pour les murs porteurs:
  - 1) murs suffisamment rigides qui ne suivront pas les déformations;
  - 2) Murs chaînés et toiture bien fixée au murs;
  - 3) Murs chaînés et toiture structurellement indépendante;
- La hauteur des murs est fonction de l'élançement requis. Certains pays comme la Nouvelle Zélande la limite à 6,5 m.
- Comme on l'a déjà évoqué, dans le cas d'une structure rigide, un mur double sa capacité à stocker l'énergie si on

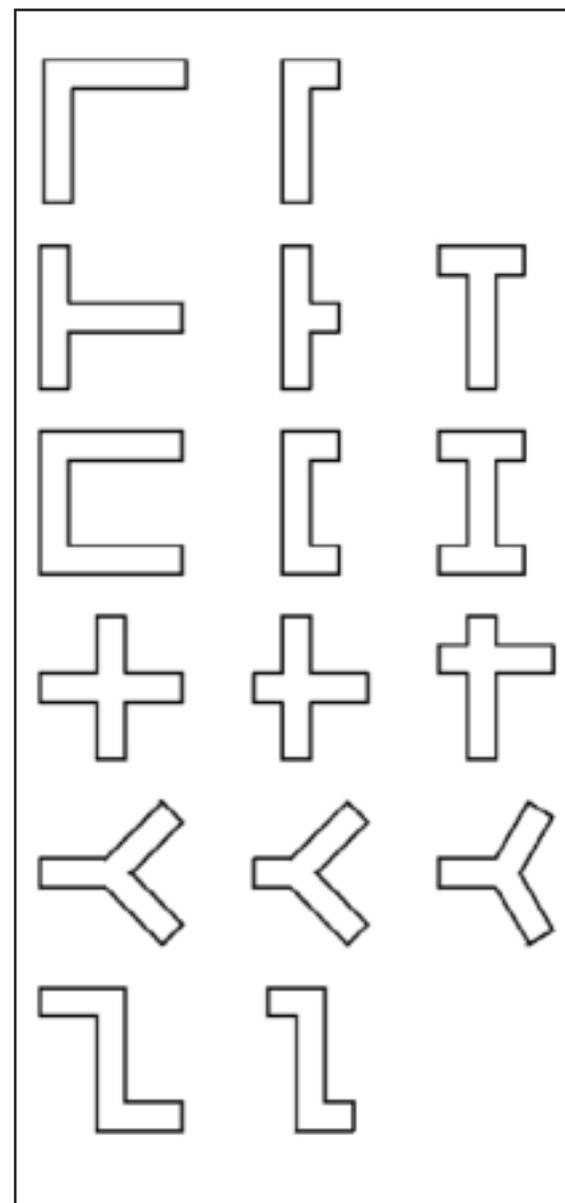


Fig. 249 Différents murs auto-portant proposés par Minke (Minke, 2001)

double son épaisseur. Par exemple, pour les constructions en terre de deux étages à Mendoza en Argentine, qui ont résister ces derniers 150 ans à plusieurs séismes forts, les murs ont des épaisseurs entre 60 et 100 cm. L'architecte Michel Frerking mentionne que les formules qu'il utilise, lui permettent de faire des maisons parasismiques en terre coulée non armée avec des épaisseurs de 65 cm. L'élançement des murs est inversement proportionnel au degré de sismicité. Un élançement plus bas est nécessaire pour une sismicité plus élevée. Selon le degré de sismicité on optera pour un élançement des murs de 1:10, 1:8, 1:7, 1:6, 1:5. Selon le type d'armature utilisée, l'élançement d'un mur peut être réduit;

- La longueur d'un pan de mur entre deux murs perpendiculaires est comprise entre 8 et 15 fois l'épaisseur du mur, selon le degré de sismicité;
- Les murs en forme de L, T, U, X, Y et Z sont auto-stables et plus résistants au renversement et à l'effondrement. Voir [fig. 249](#).
- Pour rendre les angles plus résistants, leur section transversale peut être augmentée avec des angles à 45° comme le montre la [fig. 250](#).
- Les intersections des murs et des fondations, entre les murs, et entre les murs et la toiture, doivent être adéquats

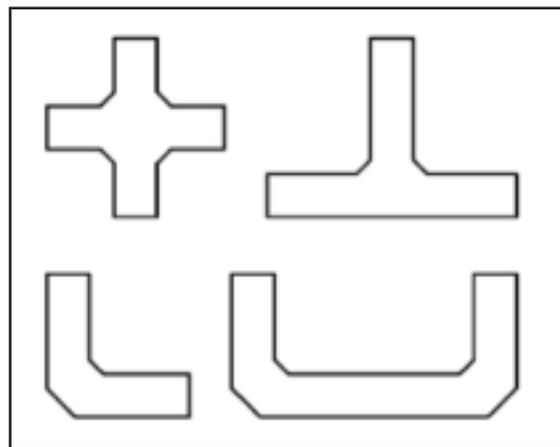
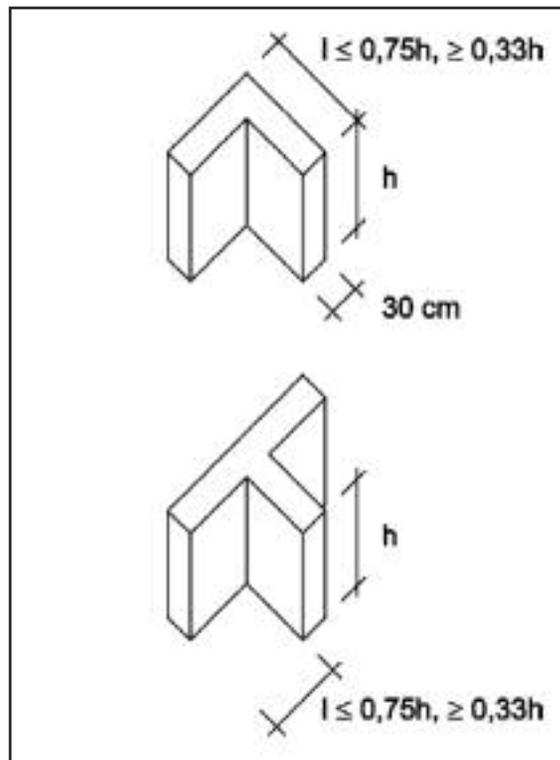


Fig. 250 Traitement de coins proposé par Minke. (Minke, 2001)

pour les maintenir ensemble pendant les secousses sismiques, de façon à ce qu'ils oscillent ensemble;

- Dans le cas de pisé, les banchées doivent être correctement calepinées sur toute la surface du mur, à l'intersection des murs et dans les angles. Avec un décalage des joints verticaux d'au minimum un quart de banchée. Les joints inclinés ne conviennent pas en zone sismique.
- L'utilisation des contreforts aide à la stabilisation verticale des murs;
- Un chaînage horizontal continu qui couronne les murs aide à la répartition uniforme des charges sismiques et des charges du plancher ou de la toiture. Il augmente la résistance des murs au renversement.
- Le contreventement permet de raidir les constructions et de transmettre les charges sismiques directement aux fondations.
- La protection des murs contre l'eau est essentiel. Un dépassement de toiture adéquat et un soubassement de 30 à 100 cm est indispensable. L'utilisation des enduits au ciment dans les constructions en terre est nuisible pour les murs.

## Ouvertures

- Éviter la concentration des contraintes;
- La quantité et le nombre d'ouvertures doivent être identiques pour deux murs parallèles.
- Limiter les ouvertures à 30% de la surface du mur. En Algérie, la restriction est des 25% dans les régions plus sismiques;
- Les ouvertures doivent être le plus éloigné possible des angles, et de l'intersection perpendiculaire de deux murs. La distance minimale entre un angle et une ouverture varie de 90 à 100 cm;
- La longueur maximale recommandée des ouvertures, portes et fenêtres, est de 120 cm;
- Un encastrement de 50 cm des linteaux de chaque côté d'une ouverture est recommandé;

## Plancher et toitures

- Choix des planchers et toitures légères, bien contreventées et bien reliés aux murs.
- Les toitures ne doivent pas transmettre des charges latérales aux murs.
- Les toitures doivent être suffisamment rigides pour maintenir leur forme pendant les secousses sismiques.
- L'utilisation de diaphragmes rigides et semi-rigides dans les planchers et la

toiture, permet de transmettre les charges sismiques de manière uniforme aux éléments verticaux. Cela permet aussi de raidir les bâtiments et de coupler les éléments verticaux.

## Armature des murs.

Le chapitre suivant est destiné à montrer les typologies d'armatures qu'on peut trouver dans différentes techniques constructives en terre.

**Annexe 2 :**  
**C2D2 Béton d'argile**  
**Environnemental (B.A.E.)**

# C2D2 Béton d'argile Environnemental (B.A.E.)

Le Ministère de l'écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement a financé le projet «Béton d'argile Environnemental (B.A.E.)», dans le cadre du programme incitatif C2D2 (Concevoir et Construire pour le Développement Durable). Huit partenaires ont participé au projet entre 2010 et 2013. (CRATERRE-ENSAG, MATEIS-INSA de Lyon, DGCB-ENTPE, groupe CB, AKTERRE, CARACOL, CTMNC, Grands Ateliers de Villefontaine)

L'objectif du projet a été de développer des bétons d'argile pour faciliter l'emploi de la terre dans la construction.

Il faut rappeler au lecteur que dans le contexte de ce projet, le terme «béton d'argile» n'est pas lié à une technique constructive spécifique. La terre à pisé, le matériau pour faire des briques de terre crue, la terre allégée et la terre coulée sont nommés «béton d'argile», comme il a été expliqué au glossaire des techniques constructives en terre.

Le projet a compris la réalisation d'un bilan des caractéristiques de la terre crue utilisée dans la construction. Des recherches en laboratoire sur le transfert des technologies du béton de ciment et des céramiques industrielles vers les «bétons d'argile», focalisées la maîtrise de la granulométrie, l'utilisation de dispersants et superplastifiants et les techniques de coagulation pour durcir le matériau

et permettre un décoffrage rapide.

Des recherches sur le comportement

hygrothermique des murs en pisé et en terre allégée (fibré à la chènevotte).

Le développement des nouveaux matériaux à base fines argilo-calcaires et de chènevotte: des briques isolantes et des panneaux vissables que l'on peut couler et démouler aussitôt. Le développement d'une terre coulée et sa mise en œuvre dans le support d'exposition de la Maison des Marais à St Omer (Pas-de-Calais) et des murs de la Maison intergénérationnelle de Manom (Moselle). Et la réalisation des plusieurs chantiers en terre coulée par l'entreprise Caracol Éco-construction.

Les résultats de ce projet sont nombreux et très importants, ils sont l'objet de publications en cours de réalisation, toutefois, je voudrais relever quelques données intéressantes pour notre sujet.

Avec le but de pouvoir réduire la teneur en eau initiale, des dispersants et l'influence du pH sur la viscosité ont été étudiés. Les dispersants industriels comme le HMP (Hexamétophosphate de sodium), le PAA (Acide PolyAcrylique), le Darvan C et le Darvan 7 (polyméthacrylate de sodium) font sa fonction dispersante dans la terre. Son utilisation a permis d'augmenter entre 1,5 à 2 fois la résistance à la compression du matériau formulé. Le tanin de châtaignier, de quebracho, de valonée et de myrobolam ont un effet dispersant sous des conditions de pH et de concentration bien maîtrisées.

Il y a un intérêt à trouver des biopolymères qui durcissent suffisamment le mortier, pour permettre un décoffrage rapide des murs en terre coulée sans l'utilisation de ciment. Sur cette direction deux adjuvants organiques naturels, la caroube et la gomme de guar ont été testés sans résultats remarquables. Les mixtures demandent plus d'eau, et même s'ils se montrent compatibles avec des dispersants, les résistances mesurées se sont montrées similaires avec et sans les adjuvants mentionnés.

Avec le même intérêt de ne pas utiliser du ciment dans la terre coulée, la gélification physique à travers la variation du pH et de la force ionique a été étudiée. La conclusion obtenue est qu'il n'est pas réaliste d'avoir des matériaux à décoffrage rapide sous cette méthode seule.

L'effet de l'ajout de sels, comme le NaCl et le KCl à 0,5-10%, sur la viscosité de mélanges a été testé. Il a été observé que l'ajout de sel se traduit par une augmentation de la viscosité uniquement si la suspension est préalablement dispersée. Sur des mixtures avec 15% de NaCl et 6% de chènevotte en pourcentage massique, une gélification a été observée. Un essai d'éprouvettes avec différents teneurs en NaCl et chènevotte a montré la possibilité de pouvoir démouler quelques éprouvettes 5 jours après son coulage.

Les matériaux à base fines argilo-calcaires et de chènevotte ont été testés mécaniquement.

ment. Plus le composite est riche en chènevotte, plus sa résistance est faible et sa plasticité élevée. «Par exemple, la déformation à rupture du composite 85% terre / 15% chènevotte est environ 10 fois supérieure à celle de la terre seule et sa contrainte à rupture 4 fois plus faible» (Rapport Scientifique, 15p dans BAE)

Ensuite je présente plusieurs chantiers en terre coulée de l'entreprise Caracol Éco-construction, un des partenaires du projet B.A.E. Les projets présentés font partie du projet de recherche.

## Hautes Luce

En 2011-2012, Caracol Éco-construction a construit une dalle en terre coulée dans une maison en Hautes Luce. Les formules pour les matériaux pour cette dalle ont été développées par Neyssensas Joris comme on a vu précédemment. La dalle est construite en trois couches, voir fig. 254. La première enrobe les tuyaux, a une épaisseur de 3cm., et est un mélange de FAC, plâtre et sable. Pour la mettre en œuvre, une machine projeteuse a été utilisée. La seconde a une épaisseur de 8cm, est un mélange de terre de Brézins avec sable à béton et 3% de ciment. La troisième couche est un enduit de FAC, sable et 10% de chaux. La dalle a un traitement de surface de 3 couches d'huile dure qui permet à la dalle de garder une bonne perspiration.



Fig. 251 Vue de la maison en Hautes Luce où Caracol a construit une dalle en terre coulée. (B.A.E. 2013)



Fig. 252 Tuyaux chauffants avant le coulage de la dalle. (Joris, 2011)



Fig. 253 Vue de la dalle en terre coulée finies. (B.A.E. 2013)



Fig. 254 Vue en coupe d'un essai de la dalle à construire, faite en atelier avant la mise en œuvre en chantier. (Joris, 2011)

## Laussane

En 2010-2011, Caracol a fait une dalle de terre coulée armée pour un projet de CaRpe Architectures à Laussane. Une dalle en terre a été choisie pour créer un confort intérieur à partir de l'inertie thermique de la dalle. Elle est coulée sur un complexe de dalle bois avec une isolation en bottes de paille (couche de 35cm). Elle a une épaisseur totale de 12cm en trois couches. La première de 8cm est un matériau de terre locale, sable à béton et paille. Elle est armée avec une toile de coco, fig. 255. La seconde est une chappe de 4cm d'épaisseur, et est faite avec un mélange de terre locale et de sable à béton. Elle est également armée en surface avec une toile de verre. La troisième couche est un enduit fait avec FAC, sable et 5% de plâtre. Elle a une finition de trois couches d'huile dure.



Fig. 257 Maison en paille porteuse et ossature bois-bottes de paille de CaRpe Architectures. Cette maison a été construite dans sa quasi totalité en chantier participatif. (B.A.E. 2013)



Fig. 255 Première couche armée avec la toile de coco. (B.A.E. 2013)



Fig. 256 Deuxième couche mise en œuvre de manière conventionnelle. (B.A.E. 2013)



Fig. 258 Vue de la dalle en terre coulée armée finie. (B.A.E. 2013)



Fig. 259 Troisième couche appliquée à la lisseuse japonaise. (B.A.E. 2013)

## Sassenage

En 2011 Caracol a construit un mur porteur en terre coulée dans une maison en ossature bois remplissage botte de paille à Sassenage. Le matériau du mur est fait avec de la terre de Brézins, du sable à béton et 3% de ciment. Le mur a une longueur de 5m et une hauteur de 5m, la base du mur a une épaisseur de 50cm et une épaisseur de 35cm au premier étage. Il a été coulé en deux parties. La première à 2,5m de hauteur qui a été décoffré au bout de 4 jours. Il est resté sous cure humide 15 jours avant le coulage de la deuxième partie. Le mur a un joint de dilatation au milieu. La fissure de retrait est apparue à cet endroit.



Fig. 260 Façade sud de la maison avec le mur en terre coulée. (B.A.E. 2013)



Fig. 261 Vue du mur en terre coulée de l'intérieur de la maison. (B.A.E. 2013)



Fig. 262 Joint de dilatation du mur et aspect du mur. (Caracol, 2013)



Fig. 262 Vue de la première partie du mur, un fois coulée. (B.A.E. 2013)



Fig. 263 Coffrage de la deuxième partie du mur à couler. (B.A.E. 2013)

J'ai eu la chance et l'opportunité de participer à deux chantiers en terre coulée pendant mon stage chez Caracol Éco-construction entre juillet et novembre 2013. Un chantier de rénovation à Paladru et le chantier du Maison de Marais à St Omer.

## Paladru

En 2013 Caracol a fait des arases en terre coulée d'une grange en pisé à Paladru. J'ai participé au chantier en tant que stagiaire. Les têtes de murs qui étaient faibles ont été démolies, puis un coffrage linéaire a été installé. Le coulage a été réalisé en trois jours à l'aide d'une minipelle, d'un malaxeur, un godet deverseur et une grue électrique. Le mélange utilisé été fait de terre de Brézins, sable à béton 0-12, 3% de ciment et 1% de dispersant. Quelques mélanges ont été fibrés à la paille (fig. 271) et aux poils de cochon. Quelques arases ont été armées avec des vieilles chaînes métalliques (fig. 266), et avec une grille de roseaux (fig. 267). Au moment de couler le mélange, il a été vibré avec une aiguille vibrante. Cette opération a permis d'avoir un mélange avec un teneur en eau initiale d'environ 12%. Dans la fig. 271 on peut apprécier la consistance du matériau, il est entre l'état plastique et visqueux. C'est au moment de le vibrer qu'il se met en place et prend la forme du coffrage. Les arases ont été tiré à la règle et talochées pour leur donner son aspect final.



Fig. 264 Vue de la grange avant de purger les mur et de mettre en place le coffrage linéaire.



Fig. 265 Coffrage linéaire prêt.



Fig. 266 Vieilles chaînes métalliques clouées à une tête de mur avant le coulage.



Fig. 267 Armature en grille de roseaux dans une arase.



Fig. 268 Arase inclinée dans un coin d'un mur. La terre coulée permet ce type de finitions.



Fig. 269 Aspect fini d'une arase. On peut voir le pisé en bas et la terre coulée en haut.



Fig. 270 Arase de terre coulée finie. On peut apprécier la ligne de l'union entre le pisé et la terre coulée.



Fig. 271 Terre coulée fibrée avec de la paille. On peut apprécier l'état visqueux (presque plastique du mélange).



Fig. 272 Aspect fini d'une arase. On peut apprécier la surface lisse qui donne une planche à coffrage jaune.



Fig. 273 Vue de la grange avec les arases finis en terre coulée.

## Maison des Marais à St Omer

Dans le cadre du projet B.A.E., Youssef Serghini Idrissi a fait une caractérisation en laboratoire du matériau formulé pour le chantier de la Maison de Marais, un nouveau musée à St Omer.

Comme on a déjà vu la formulation de ce matériau a commencé par Lucile Couvreur en 2012. Dans sa caractérisation Serghini explique que cette formule à un teneur d'argile de 42,5Kg/m<sup>3</sup>. Elle est constituée de FAC, sable, gravier, ciment et dispersant. Les résistances mécaniques sont les suivantes. La résistance à la compression moyenne de 7,45MPa. La résistance à la traction moyenne de 0,62MPa. La moyenne du module du Young dynamique est de 16GPa. Deux murs en terre coulée ont été testés au compression sur le tiers central du mur. Les résultats de la force maximale enregistrée sont 465 et 606KN. (Serghini, 2013)

De septembre à octobre 2013 une équipe de travail de Caracol a construit les modules de l'exposition permanente de la Maison du Marais, qui est actuellement ouverte au public. Les modules sont des murs de terre coulée qui supportent des maquettes, écrans, panneaux, aquariums et terrariums de l'exposition dans le hall principale du musée.

J'ai fait partie de l'équipe de travail en tant que stagiaire, avec trois autres personnes de l'entreprise Caracol. On a fait un séjour



Fig. 274 Perspective du hall principal de musée. Les modules sont des murs de terre coulée qui supportent des maquettes, écrans, panneaux, aquariums et terrariums de l'exposition. (B.A.E. 2013)

de six semaines à Saint Omer, quatre pour préparer les coffrages, une semaine pour couler et une semaine pour décoffrer. D'autres membres de Caracol ont fait ultérieurement le traitement de surfaces des modules et tous les autres travaux de finition.

Les modules sont disposés transversalement au hall principale du musée. Sous une interprétation personnelle, ils ressemblent aux lignes de terre des marais de Saint Omer. J'imagine que l'espace entre les modules, qui est l'espace de circulation pour regarder l'exposition, est l'eau des marais, là où les gens passe pour traverser l'exposition. Les modules ont des longueurs différentes et suivent des parcours avec

des angles obtus. Ils ont tous un mètre de largeur. Au début de l'exposition les modules ont une hauteur de 80 cm et ils montent progressivement en hauteur au fur et à mesure vers le fond du hall, jusqu'à une hauteur des 2,4m pour les derniers modules.

Due aux formes différentes et aux dimensions différentes des modules un coffrage sur place, sur mesure a été fabriqué. Les modules avaient de nombreuses niches et détails. Pour chaque niche, un volume en polystyrène a été placé dans un endroit précis. Chaque niche avait le volume requis pour y placer soit un aquarium, un terrarium, soit un écran. Des préparations pour des installations électriques et des leds, ainsi que des tubes de ventilation ont été

installés pour presque toutes les niches.

Les murs ont été coulés par couches, afin de donner un aspect en quatre strates de couleurs différentes. Entre chaque strate, un lit de chaux a été placé pour bien souligner la différence de couleurs. Pour la quatrième strates le coffrage a été enduit avec une terre de couleur différente. Pour faire la différence de teinte entre la troisième et la seconde strate, la seconde a été peinte à l'huile de lin. La première strate est sur-stabilisée, donc avec une couleur différente.

Le matériau pour le premier strate (10m<sup>3</sup>) a été fabriqué sur place à la bétonneuse, transporté à la brouette et coulé à la pelle. Les carrières de Boulonnais ont fabriqué en centrale 50m<sup>3</sup> de terre coulée qui ont été transporté au camion toupie. À l'aide un manitou avec une veine de 500lt, on versait le matériau dans les coffrages. Une fois versé, on vibrait le matériau pour réduire sa teneur en air.

Une série des photos montre la suite des travaux mené dans ce chantier-pilote.



Fig. 275 Coffrage pour le quatrième module. Tous les coffrages ont été installés de façon à permettre la circulation du manitou.

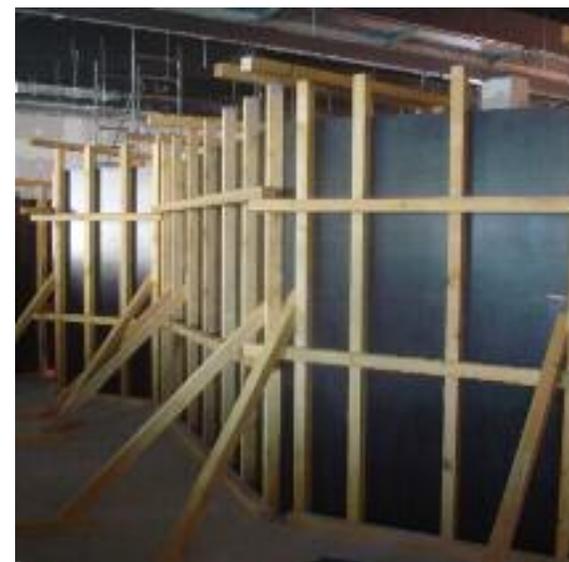


Fig. 276 Les modules plus hauts ont suivi la configuration du coffrage qui se montre dans ce photo.



Fig. 277 Vue des niches en polystyrène, avec des tuyaux de ventilation et des installations électriques à l'intérieur d'un autre module.



Fig. 278 Terre coulée qui sort du camion toupie et est versée à une veine de 500 litres.



Fig. 279 Ferrailage avec des fers à béton de quelques parties des modules.



Fig. 280 Vue d'un module avec des niches.



Fig. 281 Vue d'un module avec des niches.



Fig. 282 Manitou en train de verser le matériau dans un coffrage.



Fig. 283 Vue de module avec des niches.



Fig. 284 Module avec une maquette de l'exposition. (TripAdvisor, 2014)

# **Annexe 3 :**

# **Des projets en terre coulée**

## Architecte Francis KÉRÉ

### École Secondaire à Gando

Actuellement en construction, cette école secondaire (3.885m<sup>2</sup> de surface construite) est construite en terre coulée. La terre locale est mélangée avec du gravier et ciment, et est coulée dans un coffrage métallique de deux pièces pour former des éléments de murs autostables. L'école a un système de ventilation passive qui fonctionne avec des tubes enterrés et avec de l'eau de pluie. La communauté participe activement à la construction de l'école.

Ce travail a été primé par le Global Award, le BSI Swiss Architectural Award, le Prix Marcus et le Global Holcim Award Gold 2012. (Kéré, 2014)



Fig. 285 Coffrage métallique de deux pièces en train d'être placé. On peut apprécier la forme courbe de l'élément coulé. (Holcim Foundation, 2014)



Fig. 286 Vue d'une façade. On peut apprécier la double toiture. (Holcim Foundation, 2014)



Fig. 287 Préparation à la main du mortier pour être transporté et coulé à la main également. (Holcim Foundation, 2014)



Fig. 288 Vue des murs décoffrés et de soubassement qui suit la forme des murs. (Holcim Foundation, 2014)



Fig. 289 Des enfants de Gando en classe. Les grandes fenêtres sans vitres permettent un changement d'air continue. (Holcim Foundation, 2014)

## MAXEH TERRACRETO

Maxeh Terracreto est une entreprise à San Miguel de Allende dans la région de Guanajuato au Mexique. Cette entreprise commercialise autant de la terre coulée, que une poudre blanche, probablement un dispersant. Cette terre coulée est vendue comme sol-ciment fluide. La composition des formules est la suivante : 1% de poudre blanche, 5-10% d'eau, 5-10% de ciment et 90% des terres sableuses classifiée SM. Il est possible de faire des murs de 10cm, cela revient moins cher qu'un mur de briques cuites. Les applications sont très diverses : maison résidentielles ; habitat social (plus des 200 maisons dans la région), l'institut mexicain de l'habitat social INFONAVIT a déjà validé ce matériau pour la construction des maisons ; des bâtiments commercial ; une église ; une route ; de dalles ; et les applications que le sol-ciment.



Fig. 290 Maison en terre coulée dans un village de Allende, région de Guanajuato au Mexique. (Maxeh, 2014)



Fig. 292 Préparation du mortier à la bétonnière. (Maxeh, 2014)



Fig. 291 Versement du mortier aux seaux. (Maxeh, 2014)



Fig. 293 Camion malaxeur de l'entreprise. (Maxeh, 2014)



Fig. 294 Camions et machine utilisées. (Maxeh, 2014)



Fig. 295 Ouvriers en train de couler. (Maxeh, 2014)



Fig. 296 Coulage d'un grand volume. (Maxeh, 2014)



Fig. 297 Mur fini. (Maxeh, 2014)



Fig. 298 Bâtiment commerciale en terre coulée. (Maxeh, 2014)



Fig. 299 Route en terre coulée. (Maxeh, 2014)

## ARGILUS

### Dalle non porteuse

Argilus est un fabricant Français de produits prêts à l'emploi à base d'argile. La société exploite ses propres carrières en Vendée dans l'Ouest de la France. Argilus commercialise 165 teintes d'enduits, des badigeons, un enduit pour couches épaisses et un béton d'argile. Le dernier est un produit composé d'argile, de silicate d'alumine hydraté et de différents sables. Il est vendu en BIG BAG d'1 tonne, 500kg et en sac de 35kg. Le produit se mélange avec gravillon 4-8 ou 6-10, en proportion d'un sac pour deux seaux de gravillons avec 5 litres d'eau. Il s'utilise pour la réalisations de dalle non porteuse en 15 cm d'épaisseur maximum. Avec ce produit il n'est pas possible de construire des murs porteurs. Il s'applique sur un hérisson de gravillons ou sur des panneaux isolant, avec très peu d'eau comme une chape sèche. L'application est à la règle et à la taloche. Une dalle en béton d'argile apport de l'inertie thermique dans l'habitat, aide à la régulation hygrométrique intérieure, et amplifie le défaçage thermique.

Argilus a son propre laboratoire de Recherche et développement où elle élabore les formules de sa gamme de produits. (Argilus, 2014)



Fig. 300 Aspect de dalle terminée. (Argilus, 2014)



Fig. 301 Aspect de la consistance du mélange. (Argilus, 2014)



Fig. 302 Application du produit à la règle et à la taloche. (Argilus, 2014)



Fig. 303 Les dalles peuvent être armées, comme les dalles ordinaires. (Argilus, 2014)

## CEMATERRE

### Murs porteurs

Cématerre est une entreprise créée en 2008 par Alain Lefebvre. Cette entreprise réalise des travaux de construction dans le secteur du bâtiment, assurant la maîtrise d'œuvre. La formule utilisée, est composée de terres limono-argileuse, 0,4% de fibres de lin, de granulats du béton recyclé, 3% de chaux et 10% de ciment. Les résistances à la compression obtenues, varient entre 3 et 6MPa. Ce matériau est utilisé pour construire des éléments porteurs pour édifices simples sur R+2 (rez-de-chaussée et deux étages), des parois structurales et des cloisons.

En utilisant la terre du site ou de proximité, une centrale de malaxage mobile est amenée sur le chantier. Le matériau est préparé sur place. À l'aide d'une benne et d'une grue, il est coulé et finalement vibré. Le bâtiment de la fig. 304 a été inauguré en 2012. Il a été conçu par les architectes Marc Beri et Vincent Rey. Il a une surface de 300m<sup>2</sup> sur deux niveaux, respecte les qualifications de Haute Qualité Environnemental (HQE) et de Basse Consommation d'énergie (BCE) (Cematerre, 2014).



Fig. 304 Bâtiment HQE et BCE des architectes Marc Beri et Vincent Rey. (Cematerre, 2014)



Fig. 305 Mis en place du coffrage. (Cematerre, 2014)



Fig. 306 Centrale de malaxage mobile de l'entreprise Cématerre (Le Moniteur Tv)



Fig. 307 Coulage du matériau. (Le Moniteur Tv)