

2012

Giorgio GIOVANNINI

Ivano SEDILI

UEE 06 – « Learning From Vernacular »



LA CONSTRUCTION PARASISMIQUE APPLIQUÉE À LA TERRE CRUE

Analyse et améliorations des techniques de construction en terre crue

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. LES SEISMES ET LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE.....	4
2.1 LE SEISME DE BAM	4
2.2 UNE SOLUTION ASIATIQUE : LA « BHUNGA »	6
3. SISMOLOGIE	10
3.1 DESCRIPTION DU PHENOMENE SISMIQUE	10
3.2 TYPES D'ONDES SISMIQUES.....	12
3.3 CAUSES DES SEISMES	13
3.4 LE RISQUE SISMIQUE.....	14
4. EMPLACEMENT DE LA STRUCTURE.....	16
5. SOLLICITATION D'UN BATIMENT	18
6. CONCEPTION	20
7. ADOBE.....	21
7.1 LA BRIQUE	22
7.2 MISE EN PLACE.....	23
7.3 CONCEPTION DE LA STRUCTURE.....	24
7.4 RENFORCEMENTS	26
8. TORCHIS	28
9. FONDATIONS.....	31
10. CONCLUSION	34
BIBLIOGRAPHIE.....	36

1. Introduction

La terre crue est un matériau de construction très ancien dont les premières traces remontent à il y a 10'000 ans. Aujourd'hui elle est souvent considérée comme un matériau de moindre importance et elle a été remplacée par des modes de construction sortant de la révolution industrielle : le béton de ciment (béton armé) et la construction en acier.

Dans l'imaginaire collectif elle est souvent associée à ses faiblesses (nous avons tous à l'esprit l'instabilité des châteaux de sable) et elle donne facilement un sentiment d'insécurité.

Par contre il faut se souvenir qu'environ 40-50% de la population mondiale vit dans des maisons construites en terre crue. De plus ce matériau de construction est diffusé sur toute la surface terrestre.

Cette extraordinaire répartition de la construction en terre crue nous a stimulée toute une série de réflexions qu'on veut aborder dans la suite.

En effet la terre crue est un matériau minéral granulaire, elle se compose de cailloux, sables et argiles de différentes granulométries. Ces grains sont mélangés avec de l'eau qui grâce à son interaction avec la structure moléculaire des argiles contenues dans la terre assure le rôle de liant. La proportion entre les parties solide (les grains), liquide (eau) et gazeuse (vides, pores,...) déterminent les propriétés mécaniques et physiques de l'élément. Le matériau final est ainsi un béton d'argile qui présente certaines analogies avec le béton de ciment.

Le comportement mécanique de la terre crue est similaire à celui du béton de ciment. Elle offre un bon comportement à la compression qui est assuré par la résistance propre des grains qui la composent et du frottement à leur interface. Par contre la résistance à la traction et à la flexion est très faible et la réponse à ce type de sollicitation est très fragile.

Ils existent plusieurs techniques de construction en terre crue et elles sont plus ou moins privilégiées selon la région du globe. La terre peut être utilisée soit comme matériau de remplissage (par exemple pour une structure en bois), soit pour constituer la structure porteuse elle-même.

Il est facile d'imaginer que les propriétés d'un ouvrage d'art en terre crue dépendent de la technique de réalisation. Les techniques les plus connues sont :

- *Le pisé* : construction de murs monolithiques par compactage de couches successives de terre à l'intérieur d'un coffrage.
- *Le torchis* : la terre est mélangée avec de la paille ou d'autres matériaux fibreux pour constituer la matière de remplissage d'une structure porteuse réalisée en bois ou bambou.
- *L'adobe* : il s'agit de briques de terre crue fabriquée en usine ou sur chantier et qui sont mis en place après séchage. Ils sont assemblés à l'aide d'un mortier de terre.
- *La bauge* : un autre système constructif monolithique qui prévoit l'utilisation de terre à l'état plastique et souvent mélangée avec des fibres végétales. La matière est empilée

verticalement par des couches successives qui dépassent la largeur du mur. Une fois que la matière a tassée suffisamment on élimine la partie en excès.

Le grand avantage de la terre crue comme matériau de construction est sa disponibilité directement sur le chantier. Pratiquement au-dessous de la couche de terre végétale la matière minérale extraite peut être utilisée dans la construction. Elle garantit donc son accessibilité même dans les régions les plus pauvres du monde, où l'utilisation du béton armé et de l'acier sont impossibles à cause de leurs coûts élevés.

Comme on a dit la construction en terre crue est présente sur tous les continents. Par contre les régions touchées par cette diffusion correspondent et se superposent souvent avec des régions qui présentent un risque sismique élevé (*figure 1*). Les tremblements de terre sollicitent les structures avec des forces et des accélérations horizontales qui risquent d'endommager ou d'écraser des murs qui ont été construits pour reprendre principalement des efforts verticaux.

La terre est très sensible à ce genre de sollicitation à cause de ses mauvaises propriétés mécaniques face à la traction principalement. Comme expliquer donc la présence de construction en terre datant de plusieurs siècles dans des régions fortement sismiques ? Il est possible qu'une maison construite uniquement en terre crue puisse supporter de tels efforts ? Quelles solutions constructives ont été mises en œuvre, ou pourraient être appliquées pour améliorer le comportement d'une structure en terre ?

Et pour finir, est-ce que la terre crue, grâce à sa rapidité de construction et son adaptation à l'auto-construction, est un bon matériau pour la reconstruction après un tremblement de terre ?

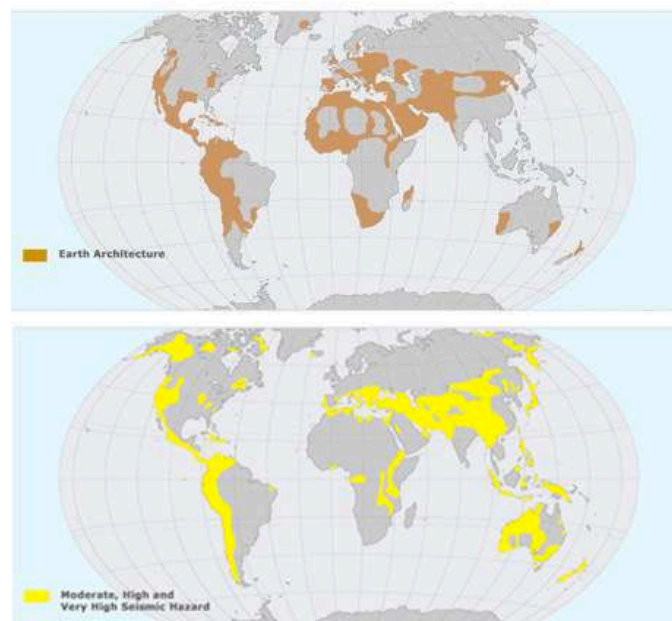


Figure 1 : Carte de la diffusion de la construction en terre crue et carte des zones à haut risque sismique en comparaison (De Sensi, 2003)

2. Les séismes et la construction en terre crue

Nous avons décidé d'aborder la thématique des effets sismiques sur la construction en terre crue par certains exemples célèbres dans la littérature. Malheureusement la résonance de ces phénomènes est due au nombre très élevé de victimes.

Comme on verra il est fréquent d'associer les morts à la faiblesse de la terre crue, mais parfois cela est une simplification inexacte. Dans la suite on va étudier certaines thématiques très discutées à travers des exemples réels.

2.1 Le séisme de Bam

Bam est une ville iranienne de moyenne importance. Elle était très caractéristique grâce à son ancienne citadelle entièrement construite en briques de terre crue datant de plus de 2700 ans. Cette citadelle était parmi les plus grandes au monde réalisée avec ces matériaux et était inscrite dans le patrimoine mondial de l'Unesco. De plus aussi une partie de l'ancienne ville était construite en terre crue.



Figure 2 : Citadelle de Bam avant le séisme. Elle est entièrement construite en terre crue et en particulier c'est la technique de l'adobe qui a été utilisée

La région est très sensible au tremblement de terre à cause de sa topographie. Les chaînes de montagne iraniennes sont situées sur la ceinture sismique qui va des Alpes à l'Himalaya, de plus son couplage avec nombreuses failles rend les régions du sud-ouest particulièrement vulnérables. En général les actions sismiques en Iran, où l'habitat n'est pas adapté aux secousses, causent plusieurs milliers de morts.

Le 26 décembre 2003 un tremblement de terre d'intensité 6.5 sur l'échelle Richter a touché la région de Bam provoquant environ 35'000 morts, plusieurs dizaines de milliers de blessés et environ 100'000 sans abri. Les coûts humains très élevés causés par ce séisme ont engendré des fortes polémiques alimentées par la presse internationale. En effet en un premier temps les victimes ont été associées à l'inadéquation des constructions en terre à supporter de tels efforts. De plus l'accent a été mis sur le manque de normes parasismiques adéquates en Iran.

Après une analyse plus approfondie et libre de préjugés ces affirmations initiales ont été démenties. En premier lieu la majorité des victimes ont été provoquées dans la destruction de la partie moderne de la ville, construite avec les matériaux de construction récents, comme le béton

armé, les briques en terre cuite et une bonne partie en charpente métallique. En effet la ville ancienne était inhabitée depuis 1860 et représentait désormais un site touristique.

Cette première constatation démontre que le comportement parasismique ne dépend pas uniquement du matériau de construction, comme on a vu avec l'écrasement des structures plus récentes avec des matériaux modernes.



Figure 3 : Ancienne citadelle de Bam après le séisme du 2003

Une autre remarque nécessaire est le fait que la citadelle en terre crue a survécu pour des milliers d'années avant de s'effondrer. La solidité légendaire de cette citadelle a endormi l'opinion publique sur le risque sismique dans la région car elle n'a pas subi de dommages depuis longtemps. Cela a conduit, peut-être, à sous-estimer les problèmes sismiques qui touchent la région.



Figure 4 : Images de la destruction de la ville de Bam. On remarque les murs en adobe complètement détruits

D'autres versions reconduisent le degré élevé de destruction à une remise en état des constructions anciennes. Il a été démontré par un certain nombre d'exemples que les constructions restructurées ou qui ont subi des travaux de « renforcement », paradoxalement, ont été parmi lesquelles qui ont subi plus de dégâts. Cela s'explique par une perte de savoir faire et de maîtrise des techniques constructives traditionnelles. À Bam une analyse plus précise a confirmé cette théorie. Les maisons qui n'ont pas subi des rénovations récentes ont subi moins de dégâts par rapport à celles renforcées. Il apparaît évident l'importance du soigne assuré à ces interventions.

De plus d'autres études ont attribué une partie des causes du collapse des bâtiments en terre crue à la dégradation provoquée par les termites, qui ont contribué à réduire la capacité portante des murs en réduisant la cohésion entre les particules granulaires qui les composent.

Des constatations similaires, sur la problématique des travaux de renouvellement, ont été faites en Italie, à San Giuliano. Dans ce cas le village ancien construit en pierres a résisté mieux que les constructions en béton armé, qui ont provoqué le plus grand nombre de victimes. Un autre exemple est à Armenia en Colombie, où en 1999 après le séisme les bâtiments construits avec matériaux industriels étaient très endommagés et il a fallu les détruire, alors que les maisons en terre et bambou, qui sont très répandues, ont résisté assez bien.

Un aspect à souligner est la perte de connaissance des techniques constructives traditionnelles. En effet traditionnellement l'architecture était adaptée de façon à corriger les points faibles des matériaux utilisés. Avec l'introduction des nouveaux matériaux plus performants les règles de base de la conception ont été oubliés pour chercher des formes plus particulières qui ressemblaient à celles utilisées dans la construction en béton armé et en acier. Cela a eu des effets néfastes pour les bâtiments en terre crue car ses faiblesses ont été accentuées au lieu d'être compensées par une conception plus soignée. Cet aspect a été constaté par les ONG au Salvador, où les autochtones ont voulu des maisons plus grandes qui n'étaient pas adaptées aux risques sismiques de la région.

2.2 Une solution asiatique : la « bhunga »

Un cas très intéressant des techniques parasismiques dans la construction en terre est celui de la région de Kachchh, en Inde. L'utilisation de la terre est très diffusée dans le pays : on estime qu'environ le 30% de l'architecture soit construite avec ce matériau.

Comme tout les matériaux qui ne sont pas proprement utilisés, le problème principal des constructions en terre crue dans les zones sismiques est la fragilité. Souvent les structures se trouvent dans des conditions précaires, en mettant en danger les occupants. Ces constructions ne résultent plus des savoir-faire transmis par la tradition mais elles sont un simple assemblage de matériaux facilement accessibles en situ.

Cependant, dans des certaines régions, il existe des typologies de construction qui persistent et qui permettent d'offrir une réponse optimale aux calamités naturelles telles que les séismes.

La « bhunga » c'est une typologie de structure qui a présenté un comportement particulièrement favorable (même dans les conséquences liées à une ruine) lors du tremblement de terre qui a frappé la région de Kachchh le 26 janvier 2001. Cet événement a conduit la population à une prise de conscience vers la valeur des constructions traditionnelles en terre crue : le séisme a en effet touché

les habitants des maisons en pierre et pas ceux qui vivent dans des constructions en terre. Pour la reconstruction, ceci a poussé les habitants à se réorienter vers un habitat en terre crue.

Concernant les « bhungas », elles se caractérisent par leur forme compacte (en prévalence circulaire) et par les dimensions réduites. Leur toit est constitué généralement en paille et il est donc léger (*figures 5 et 6*).

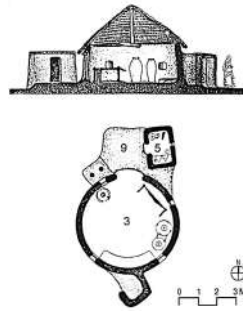


Figure 5 : Schéma d'une bhunga traditionnelle (Chiodero, 2008, p. 14)



Figure 6 : Bhunga traditionnelle en bauge (Chiodero, 2008, p. 17)

Après le tremblement de terre de 2001, les critères structurels parasismiques ont été développés et améliorés. Ils tiennent toujours en compte l'utilisation de matériaux locaux, une construction facile (pour garantir l'auto construction) et un coût réduit comme objectif prépondérant.

Des techniques adoptées sont par exemple la disposition du toit qui n'est pas placé directement sur les murs mais sur des appuis indépendants. De cette façon, son poids ne va pas à affecter les parois. Au niveau de fondations, des pierres sont utilisées pour qu'elles soient plus stables et puissent ainsi garantir une base solide à la structure. Des renforcements sont souvent introduits dans les murs (*figure 7*).



Figure 7 : *Bhunga renforcée avec bambou (Chiodero, 2008, p. 24)*



Figure 8 : *Bhunga en pisé stabilisé (Chiodero, 2008, p. 25)*

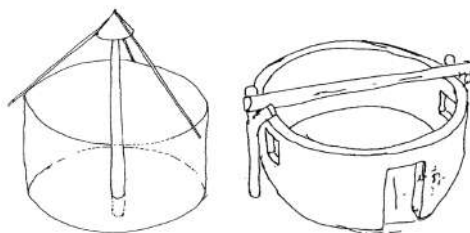


Figure 9 : *Soutènement indépendant pour la toiture (Chiodero, 2008, p. 30)*

Le coût moyen d'une « bhunga » est de 30000 roupies indiennes, l'équivalent d'environ 450 euro. Après le séisme des organisations non gouvernementales ont aidé la population locale : financièrement d'un côté et pour la formation qui permet l'auto construction de l'autre.

Malgré le coût réduit des constructions, ce qui souvent et malheureusement conduit à des discours liés à problèmes de type social, les habitants de la région ont une très bonne perception de leur habitat. Ils ont en effet participé activement à sa création et ils sont fiers de la valeur culturelle de leurs « bhungas ».

En résumant, on a donc observé ce qui a résisté au tremblement de terre dans la région. On l'a analysé et on a établi pourquoi il était encore en pied. Puis on a appliqué ces techniques. Cependant celles-ci n'ont pas été des nouvelles découvertes mais plutôt une redécouverte des connaissances du savoir faire traditionnel. Seulement ensuite on a cherché de développer ces compétences pour obtenir des solutions encore plus efficaces.

Un autre exemple intéressant est celui des « Hakka Houses » chinoises. Elles se caractérisent par leur forme ronde, qu'on a vu être la forme idéale pour une construction parasismique. En particulier il y a un cas documenté qui indique un bon comportement de ce type de construction face aux séismes : le « Huangji Castle ». Un tremblement de terre a fissuré les murs de ce bâtiment, qui malgré tout a résisté aux secousses. Maintenant il est appelé « Earthquake Resistant Castle » (*figure 10*).

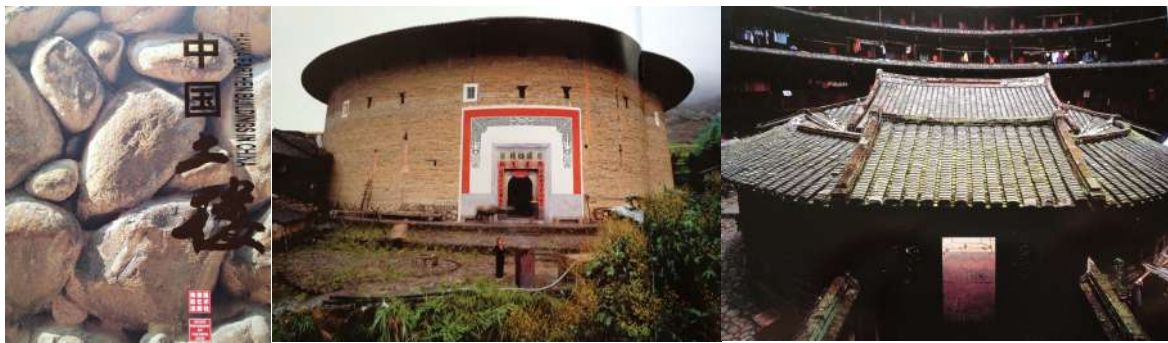


Figure 10 : Huangji Castle en Chine (Qu & He, 2006)

En outre on observe que dans les murs des « Hakka » il y a des renforcements horizontaux en bambou (*figure 11*).



Figure 11 : Renforts horizontaux dans les murs (Ostrowski, 2009)

Cependant, on ne peut pas conclure que tous ces éléments ont été introduits dans la structure avec un but parasismique.

Remarque : on a parlé plusieurs fois de forme ronde mais elle n'est pas une exigence : la forme est plus difficile à atteindre et on perd beaucoup d'espace. Une maison de forme carrée est aussi un très bon choix. Comme on verra dans la suite, l'important c'est d'éviter des formes complexes qui favorisent la concentration des contraintes dans des endroits précis.

3. Sismologie

3.1 Description du phénomène sismique

Avant d'aborder la thématique de la construction parasismique appliquée aux constructions vernaculaires et en particulier celles en terre crue, on commence par introduire le phénomène des tremblements de terre. En effet il nous a semblé fondamental d'aborder les origines et les effets principaux des séismes pour pouvoir mieux comprendre l'analyse des systèmes constructifs.

La sismologie est la science qui analyse les causes des tremblements de terre et la propagation des ondes dans le sol.

Dans le cours de son histoire, l'homme a de tout temps subi des catastrophes majeures en raison des séismes. Cependant, définir ces phénomènes « catastrophe naturelle » n'est pas entièrement exacte. Les aspects catastrophiques sont en effet attachés à une manque de préparation face au séisme dans laquelle se trouvent les ouvrages construits par l'homme, et à toute une série d'omissions de l'homme vers l'environnement bâti.

Date	Pays	Magnitude	Victimes
27.02.2010	Chile	8.8	500
28.10.2008	Pakistan	6.4	400
12.09.2007	Pérou	8.0	500
23.02.2005	Iran	6.4	612
08.10.2005	Pakistan	7.6	100 000
26.12.2003	Iran (Bam)	6.5	35 000
03.03.2002	Afghanistan	7.4	100
17.08.1999	Turquie	7.6	30 000

Tableau 1 : Quelques exemples d'événements sismiques récents liés à des Pays où la construction en Terre est très diffusée

Le séisme est un phénomène naturel qui fait partie du complexe fonctionnement de notre planète. Ses effets sont la démonstration évidente de la dynamique, toujours active, de la Terre.

L'origine du terme « séisme » dérive du grec « seismós » et ça signifie secousse. Le mot résulte du fait qu'un tremblement de terre est défini comme une succession de mouvements rapides dans le terrain. Ces impulsions sont causées par des fractures qui se vérifient suite à l'accumulation de contraintes élevées dans le temps (plusieurs milliers d'années). Ces cassures ont principalement lieu dans la lithosphère.

Pour aller plus en détail, nous pouvons affirmer que le matériel qui compose la partie supérieure du globe est un solide élastique. Il existe donc un module d'élasticité qu'on peut trouver en analysant la relation linéaire contrainte-déformation qui caractérise ce matériau (*figure 12*). Le sol qui se déplace à basse vitesse, il entraîne une déformation élastique des roches. Lorsque cette contrainte devient trop importante, c'est-à-dire lorsque on atteint la résistance au cisaillement du matériau, la rupture de la roche se produit brutalement : l'énergie se relâchent et nous assistons au séisme (*figure 13*).

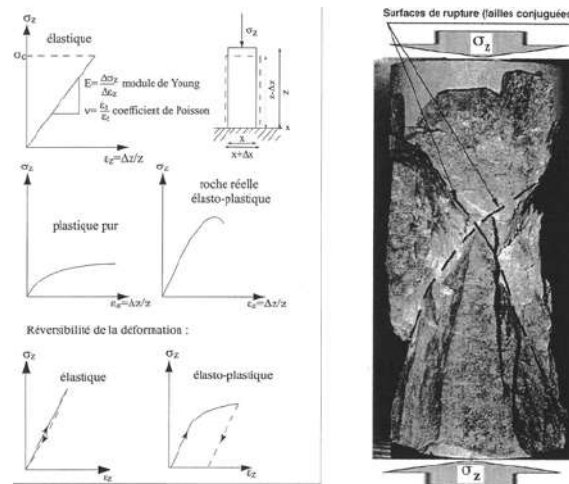


Figure 12 : Schémas d'un essai de résistance à la compression uniaxiale et schémas des différentes catégories de solide théoriques (Parriaux, 2009, p. 434)

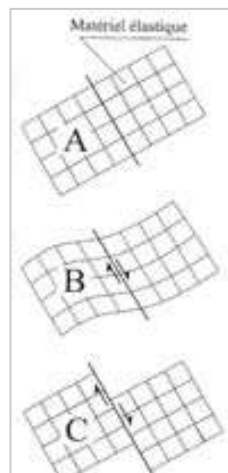


Figure 13 : Illustration de la rupture suite à une déformation progressive du matériel élastique. Quand la résistance au cisaillement du sol est dépassée (C) il y a la rupture avec déplacement relatif à l'interface des deux éléments (Parriaux, 2009, p. 60)

Après un séisme, le cycle recommence. Par conséquent, nous remarquons que plus le temps entre deux tremblements de terre est long, plus il faut s'attendre à un séisme violent, car la quantité d'énergie accumulée avant une nouvelle rupture sera supérieure.

Pour désigner la source du séisme nous utilisons le terme technique de foyer ou hypocentre. A partir de ce point, les ondes se propagent dans toutes les directions. Si le milieu du terrain est homogène et isotrope, nous pouvons représenter les surfaces d'onde sous forme de sphères concentriques. Le centre commun placé à la verticale et projeté au niveau de la surface s'appelle épiceutre (*figure 14*).

Souvent les séismes sont suivis par des secousses secondaires d'intensité mineure appelées répliques. Il faut attribuer ces ébranlements à la recombinaison du matériel de l'écorce dans le nouvel état de contrainte.

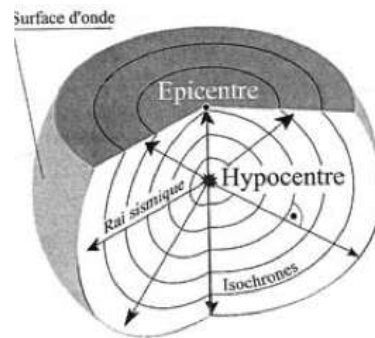


Figure 14 : Position du foyer et de l'épicentre d'un séisme dans un milieu homogène et isotrope (Parriaux, 2009, p. 64)

Remarque : le principe de propagation des ondes à l'intérieur du globe, ainsi que les lois de réflexion et de réfraction sont très complexes. Dans le cadre de notre recherche ils ne seront pas approfondis vu que nous nous intéressons d'avantage aux conséquences en surface.

3.2 Types d'ondes sismiques

Il existe deux façons de créer une déformation initiale dans un solide : par compression ou par cisaillement. Une partie des ondes traverse le volume du corps, tandis que l'autre reste à la surface.

Les ondes de volume peuvent être générées par choc en compression ou par choc en cisaillement. Dans le premier cas, lorsque on frappe le solide par compression, on observe une déformation qui affecte le volume et qui correspond à une onde longitudinale. Les différents points du solide vibrent avec un mouvement sinusoïdal qui suit la direction de propagation de l'onde. La région sollicitée est composée d'une série de zones comprimées (les nœuds) et en traction (ventres). Etant donné que ce type d'ondes est le plus rapide, on les appelle ondes primaires (ondes P). Ce sont en effet les premières ondes qu'on perçoit lors d'un séisme.

Si par contre on applique un choc sur la surface supérieure du solide, la direction d'oscillation des pointes est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. On parle donc d'ondes transversales. Dans ce cas, des efforts de cisaillements se produisent entre des volumes élémentaires qui composent le solide. Ces ondes sont absorbées par les liquides et se déplacent moins vite que les ondes P. Elles sont appelées ondes secondaires (ondes S).

Comme anticipé ci-dessus, un choc peut aussi entraîner des déformations qui intéressent seulement la surface du solide. On distingue par exemple les ondes de Rayleigh, qui génèrent une sorte de houle sous la surface du solide, et les ondes de Love (ondes L). Les ondes de Love sont un type particulier d'onde de cisaillement transversal. En effet, au contraire des ondes S, le cisaillement se produit horizontalement. Même si elles sont perceptibles seulement près de la surface et que leur vitesse est encore inférieure par rapport aux autres, les ondes de surface sont très destructives et jouent un rôle central dans la dévastation d'ouvrages pendant les tremblements de terre.

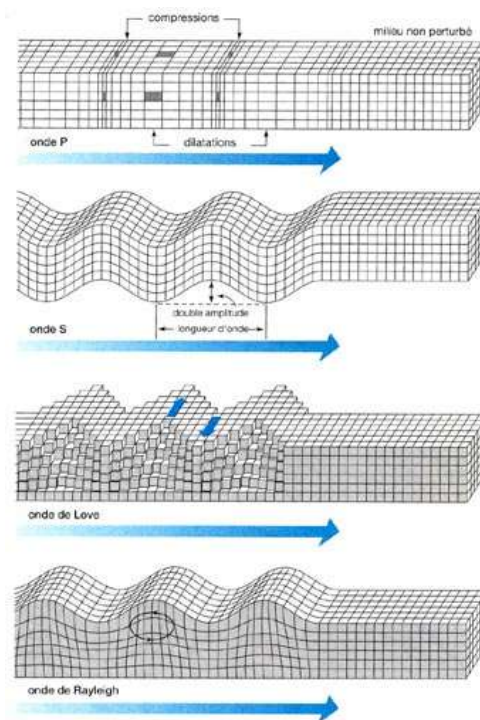


Figure 15 : Différents types d'ondes dans un solide avec comportement élastique (Bolt, 1978)

3.3 Causes des séismes

En général on peut diviser les séismes en deux catégories. On distingue entre les tremblements de terre qui touchent des zones très vastes et les phénomènes plus locaux. Les premiers sont souvent d'origine tectonique ou volcanique. Par contre les deuxièmes qui sont moins violents sont principalement dus aux activités humaines. Dans le cadre de ce travail on s'intéressera principalement au premier type de séisme, qui est souvent la cause des grands dégâts

Les séismes tectoniques

Ce type de séisme est provoqué par le cisaillement entre les failles actives. L'épicentre se situe à la verticale des plans de subduction.

Les séismes volcaniques

Les ébranlements sont provoqués par la montée du magma vers la surface. Cela se fait par des ruptures dans la croûte, des explosions ou encore par des effondrements de chambres magmatiques.

Les séismes artificiels

Ce type de séisme est engendré par les actions humaines ; il peut s'agir d'explosions nucléaires souterraines, les changements de pressions et des contraintes dans le sous-sol par la construction de barrages ou par des ouvrages souterrains pour le drainage.

Autres séismes

Un dernier type de séisme naturel est provoqué par l'effondrement des cavités naturelles suite à la dissolution de la roche qui les compose. On assiste à ces événements en général dans les pays karstiques où le calcaire et le gypse sont dissous par les eaux acides. Normalement les effets provoqués sont très restreints.

Pour finir il faut citer l'effondrement des anciennes minières, qui sont soutenues uniquement par des piles souples en bois. Selon l'extension de la zone minière les effets peuvent être plus ou moins importants. Cela peut arriver jusqu'au point de modifier la topographie du lieu et créer des lacs à cause des perturbations de la direction d'écoulement de l'eau.

3.4 Le risque sismique

Le risque sismique est un concept qui doit être strictement lié aux dégâts qu'un événement séismique peut provoquer. L'intensité est mesurée selon différentes échelles.

L'échelle Mercalli a été conçue en 1902 et a subi un procédé de modernisation dans les années suivantes. Elle a l'avantage d'être très parlante pour ce qui concerne les effets d'un séisme sur l'environnement construit. Ses limites principales sont liées à ses caractéristiques qualitatives (et non quantitatives), l'impossibilité de son application dans des zones non bâties et le fait qu'elle ne prend pas en compte la différence de qualité entre les ouvrages.

L'échelle Richter a été introduite en 1935 et elle a l'avantage de définir objectivement la puissance des séismes par la mesure quantitative de leur énergie émise. Nous n'analysons pas en détail les formules qui permettent de déterminer la magnitude par cette échelle. Il faut par contre souligner qu'il s'agit d'une échelle logarithmique donc une magnitude 5 présente des amplitudes 10 fois inférieures à une magnitude 6 et 100 fois inférieures à une magnitude 7.

Le risque sismique n'est pas liée uniquement à la puissance d'un événement mais est composé par trois notions fondamentales.

L'**aléa** ou **danger** caractérise le séisme d'un point de vue physique par la mesure de la magnitude, de l'amplitude, de la durée, l'intensité et le spectre des vibrations. Elle est modélisée sur la base du période de retour, c'est-à-dire la probabilité qu'un tel événement va se produire dans un période de référence.

La **vulnérabilité** estime les effets de destruction sur les objets. Elle varie de 0 (aucun dégât) à 1 (destruction totale) et est clairement liée au degré d'occupation du territoire.

La **valeur des biens** représente la perte financière correspondant à la destruction des objets matériels. Elle est très difficile à estimer.

La prédiction des séismes est très compliquée et souvent impossible. Ils existent nombreux signaux précurseurs mais l'expérience a montré que la combinaison de ces derniers n'est pas toujours fiable. Ceux-ci peuvent être :

- L'accentuation de l'activité volcanique ou sismique
- Des variations dans le niveau d'eau dans les puits
- Modifications dans la topographie
- Des variations dans la mensuration du radon ou du potentiel électrique
- L'observation des animaux

De plus les facteurs humains jouent un rôle très important qui est liée à l'interprétation de ces signaux et à la rapidité d'intervention.

Vu l'impossibilité de réduire le risque sismique il est mieux de suivre un certain nombre de règles dans la construction. Cela doit se faire indépendamment du matériau de construction, mais il faut être encore plus attentifs avec des matériaux pas adaptés pour résister à ce type de sollicitation comme c'est le cas pour la terre crue.

Le choix du site est fondamental et il est le facteur qui influence de manière significative la réponse locale d'un tremblement de terre. Pour un même séisme deux terrains différents peuvent donner des réponses vibratoires très différentes. Le milieu interagit fortement avec le signal vibratoire qui peut être modifié pour ce qui concerne la durée, l'amplification et la répartition fréquentielle.

Un signal sismique en effet subit des transformations et la réponse vibratoire d'un ouvrage dépend de trois facteurs.

- Le signal transmis par le substratum rocheux en profondeur, c'est-à-dire le signal originel au foyer.
- La transformation qui se produit lors de la traversée de terrains avec différentes propriétés (effet de site).
- L'interaction sol-ouvrage, avec la transmission des sollicitations qui passent du terrain à la construction et qui produisent de nouvelles résonances.

Les observations ont montré que les effets de site peuvent avoir des conséquences importantes. Aux sommets des reliefs les amplitudes sont normalement amplifiées par rapport au même type de terrain situé en plaine.

Les plaines alluviales, constituées par le remplissage d'une vallée par des terrains détritiques meubles sont nettement le site le plus défavorable. La teneur en eau modifie la réponse du site et est généralement défavorable.

Les fréquences plus défavorables pour les ouvrages de génie civil sont comprises entre 0.1 et 30 Hz. Les plus faibles ont un impact important sur les ouvrages élancés comme les ponts et les tours. Les autres provoquent des destructions importantes dans les bâtiments de petite taille et dans les ouvrages plus rigides. Dans le cadre de notre travail, on se concentrera principalement sur ces dernières car les constructions en terre sont souvent liées à des petits bâtiments. L'expérience a montré que les bâtiments bas, de 1 ou 2 étages sont moins touchés par les sollicitations horizontales et donc on prendra en compte cette constatation dans la conception des structures en terre crue.

D'autres effets de site célèbres qu'on citera sans traiter dans les détails sont la *liquéfaction des sables fines* (la modification des pressions interstitielles réduisent la résistance au cisaillement inter-grains ce qui provoque l'enfoncement des bâtiments), la *thixotropie des argiles* (la propriété d'un matériau de se comporter comme un solide à l'état à repos et comme un liquide sous sollicitation). De plus un tremblement de terre peut déclencher un *glissement de terrain* ou un *éboulement*. Ces phénomènes risquent de provoquer plus de dégâts que le séisme lui même.

Avant d'analyser des solutions constructives pour améliorer le comportement d'une structure soumise aux accélérations horizontales des tremblements de terre il est donc primordial le choix d'un lieu favorable pour la construction.

4. Emplacement de la structure

Comme nous avons vu, l'emplacement est le premier facteur qui, si mal choisi, favorise la détérioration d'une structure lors d'un séisme. Le choix du terrain sur lequel bâtir une maison est fondamental et nécessite pourtant une décision appropriée et pertinente. Une maison construite sur un mauvais sol en respectant toute une série de paramètres parasismiques et qui possède donc une excellente conception présentera les mêmes risques qu'une construction de mauvaise qualité. Il faut donc établir quels sont les emplacements dangereux qui peuvent porter à l'effondrement de la structure lors d'un tremblement de terre. En général, les caractéristiques adaptées sont un terrain plat et sec avec un sol dur. Pour l'adobe non stabilisé le sol à bâtir doit offrir une résistance à la compression de 20 N/cm^2 , tandis que pour l'adobe stabilisé ça suffit la moitié (Doat et al., 1979).

Les zones qui ne sont pas appropriées à la construction à cause d'une mauvaise qualité de sol sont les marécages. Les terres meubles ou peu consistantes composées d'argiles limoneuses, dépôts de matériaux (plaines alluviales), etc. ne sont pas un bon choix pour la construction, soit pour recevoir une maison. En effet, en cas de séisme et en présence d'eau, le phénomène de liquéfaction cité dans le paragraphe précédent peut apparaître et porter à l'écroulement complet du sol (*figure 16*). La ruine de la construction sera dans ce cas inéluctable. Nous pouvons ainsi comprendre l'importance de drainer le sol.

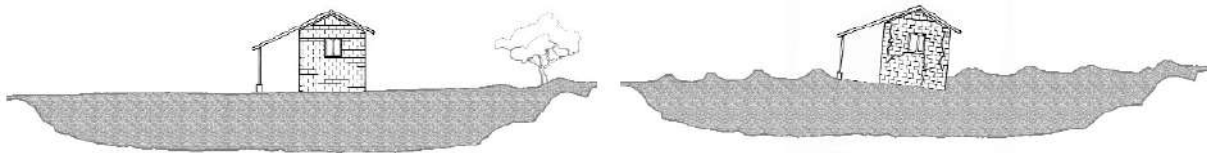


Figure 16 : Emplacement dangereux sur un terrain meuble (Carazas, s.d.)

Il est préférable d'éviter aussi un terrain qui présente une déclivité pour plusieurs raisons :

- La maison ne doit pas se trouver sur une pente comme elle pourrait glisser ;
- La maison ne doit pas être coupée dans la déclivité. Ceci peut causer la destruction du mur adjacent sous l'effet de la force horizontale du terrain (qui augmente considérablement lors d'un séisme). Une marge de sécurité doit être prise en compte lorsqu'on veut adopter cette solution (*figure 17*) ;
- La maison ne doit pas être construite juste au bout d'une déclivité comme un séisme peut provoquer un effondrement et un glissement de terrain de cette zone (*figure 18*) ;
- La maison ne doit pas se trouver aussi dans une zone basse directement proche d'une falaise comme un tremblement de terre peut générer une chute de pierres le long de la déclivité ou des éboulements (*figure 19*).

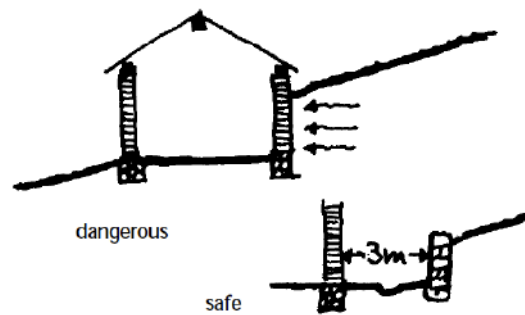


Figure 17 : Emplacement qui coupe la déclivité du terrain (Minke, 2001, p. 8)

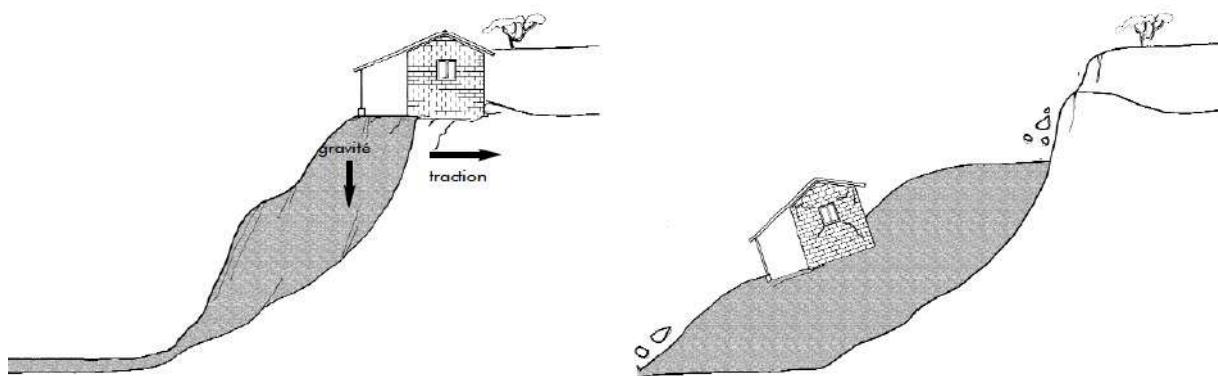


Figure 18 : Emplacement dangereux au bout d'une déclivité (Carazas, s.d.)

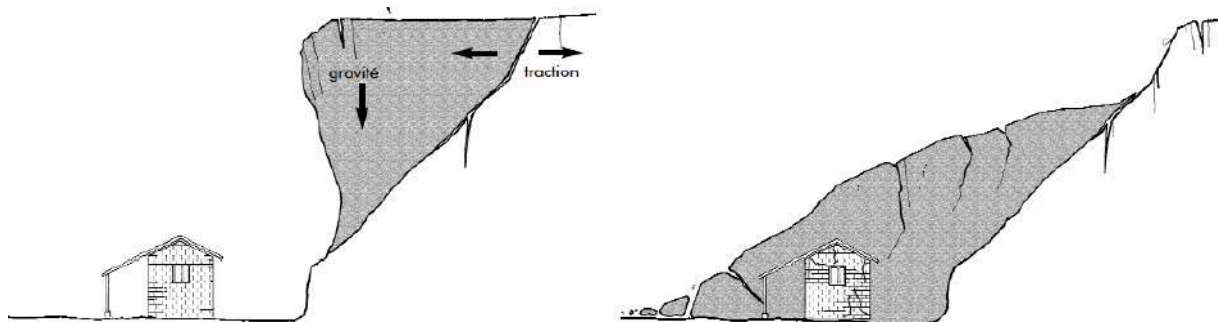


Figure 19 : Emplacement dangereux sous une falaise (Carazas, s.d.)

Un exemple qui concerne ce dernier cas d'emplacement dangereux est le séisme du 5 mai 1970 en Pérou. Suite au séisme de magnitude 7.8, une avalanche de débris s'est engendrée à une hauteur entre 5500 et 6400 m d'altitude et elle a emporté la ville de Yungay, 3000 mètres plus aval. L'énorme masse de matériel (roches, glace, neige et terre) à frappée la ville à une vitesse supérieure à 300 km/h et à causé la mort de quasiment 20000 personnes (figure 20). Face à la violence du phénomène, il est donc peu important remarquer que la majorité des constructions été en adobe plutôt qu'en béton.



Figure 20 : L'avalanche qui s'est abattue sur une grande partie de la ville

Si une pente est donnée il faudrait donc créer une plateforme horizontale pour que la maison soit stable. En outre, sur cette plateforme, il faut placer la maison à une distance suffisante par rapport aux déclivités.

Pour une construction très massive, un sol moins rigide (par exemple un sol sablonneux) est recommandé, tandis que pour des maisons légères et plus flexibles un sol rocheux est idéale. Ce discours dérive du fait que une maison très rigide attire plus d'efforts sans pouvoir se déformer, donc si le sol est flexible il se déformera sans solliciter excessivement la construction.

5. Sollicitation d'un bâtiment

Un séisme produit simultanément des forces horizontales, des oscillations verticales et de la torsion. La réponse de chaque structure sera différente en fonction de ses caractéristiques. Sa forme et les matériaux qui la composent sont par exemple déterminants. Lors d'un tremblement de terre, les bâtiments sont souvent affectés par les forces horizontales. En effet, ces dernières sont normalement plus du double par rapport aux forces dans le sens vertical. Le danger principal dans le cas des mouvements horizontaux c'est que les murs de la structure peuvent sortir de leur plan et conduire ainsi à l'effondrement du toit.

Afin d'étudier son comportement lors d'un séisme, on considère un mur simple d hauteur h , longueur l et épaisseur e . La résistance du mur est beaucoup plus grande dans le sens longitudinal car l'inertie ($I_{long} = \frac{l^3 * e}{12}$ et $I_{tran} = \frac{e^3 * l}{12}$) est beaucoup plus importante dans le sens longitudinal que transversal à cause de $l \gg e$. De plus cet effet est amplifié par la troisième puissance du terme dans

l'équation. Si le mouvement horizontal se produit dans le sens transversal au mur, on observe en effet que les dégâts seront beaucoup supérieurs. En introduisant des renforcements verticaux dans ce cas plus défavorable, on voit que la résistance augmente mais qu'elle reste très insuffisante. Une amélioration de la réponse est possible en introduisant un chaînage au bout du mur, par exemple en bois. Deux murs parallèles non contreventés ne résisteront pas à une sollicitation transversale. La meilleure solution est donc de construire une boîte chaînée avec quatre murs orthogonaux (*figure 21*). Les murs perpendiculaires constituent ainsi une sorte de contreventement et la chaîne permet de réduire les dégâts dans les murs qui se trouvent en position défavorable (c'est-à-dire perpendiculaires à la direction de la sollicitation).

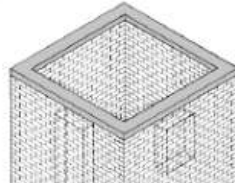


Figure 21 : Système de chaînage au bout des murs qui stabilise la section (Carazas, s.d.)

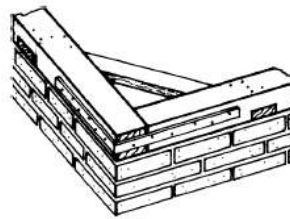


Figure 22 : Détail d'un chaînage en bois au niveau de l'angle (Carazas, s.d.)

La déformation horizontale causée par un séisme de puissance moyenne est approximable dans l'ordre de 0.1 - 0.3 m. L'accélération horizontale vaut 0.15-0.30 g. Pour une accélération de 0.30 g, la force équivalente qui agisse horizontalement sur le bâtiment correspond au 30% de la charge ultime de la structure ! (Minke, 2001)

Les oscillations verticales sont le deuxième type d'oscillation qui produit le passage des ondes sismiques. Dans la plupart des cas, les forces verticales que les vibrations génèrent dans la construction ont des conséquences minimales pour la stabilité. Les effets majeurs affecteront les éléments les plus lourds comme par exemple les structures de toiture, les éléments suspendus (balcons), les arches, etc.

Concernant la torsion, elle dérive du déplacement horizontal du sol combiné à des forces latérales. Dans ce cas, les effets dépendent surtout de la forme de la structure : une forme compacte et régulière assure une résistance supérieure, tandis qu'une construction de forme irrégulière, où les centres de gravité et de torsion ne coïncident pas, résulte beaucoup plus exposée à subir des dégâts.

6. Conception

La conception est une étape fondamentale dans la construction d'une structure. Elle requiert une bonne vue d'ensemble et se base sur une bonne expérience et savoir-faire plutôt que sur des calculs analytiques. Elle mérite une attention particulière car les choix faits à ce niveau ont des répercussions importantes pour la suite du dimensionnement. Pour ce qui concerne le génie parasismique des lacunes dans cette étape peuvent conduire à des conséquences désastreuses car une erreur est difficilement rattrapée par les calculs.

« *Un bâtiment bien conçu et mal calculé se comportera toujours mieux face aux séismes qu'un bâtiment bien calculé, mais mal conçu.* » (*Génie Parasismique : Conception et dimensionnement des bâtiments*, Pierino Lestuzzi et Marc Badoux, p. 94)

La règle de base dans la construction parasismique est la régularité, car les discontinuités et les formes extravagantes du bâtiment conduisent à une amplification des sollicitations. Par contre une forme compacte et un système porteur régulier facilitent un cheminement clair et direct des efforts et donc un comportement sismique favorable. Une bonne conception peut déjà garantir au moins le 75% de la sécurité d'une structure face aux sollicitations sismiques.

Les problèmes sismiques classiques sont :

- L'étage souple
- Les colonnes captives
- Le martèlement
- La liquéfaction

La première thématique qu'il faut aborder lors de la conception est la forme du bâtiment. Il s'agit d'un choix apparemment simple mais fondamental pour la suite des travaux. Comme nous avons dit il faut privilégier des formes le plus régulières et compactes possibles qui assurent un bon comportement de la structure dans tous les directions. De plus la hauteur des bâtiments joue un rôle de première importance, quelque soit le matériau de construction. Pour ce qui concerne la construction en terre il est important de se limiter à 1 ou maximum 2 étages, à cause des fréquences qui sont générées par les séismes.

Les formes complexes favorisent des vibrations et torsions localisées qui sollicitent excessivement certains endroits qui peuvent conduire à des ruptures localisées et par la suite à l'effondrement du bâtiment entier.

Les formes symétriques sont donc les plus indiquées, car elles ont la caractéristique d'être régulières et de plus elles sont généralement compactes (*figure 23*). La présence de plusieurs axes de symétrie assure la coïncidence du centre de gravité et de cisaillement, donc évite la propagation des efforts de torsion. Les efforts sismiques passent par le centre de masse (M) de l'ouvrage et sont distribuées aux éléments de la structure à partir du centre de cisaillement¹ (S). Si ces deux ne coïncident pas il y a l'introduction d'un moment de torsion dû à l'excentricité de cette force. Dans ce cas le bâtiment est soumis à des efforts de traction combinée à des sollicitations de torsion qui augmentent les déformations. Dans la construction en terre crue des déformations excessives sont à éviter car elles auront l'effet de réduire la cohésion entre les grains et de développer des fissures.

¹ Le centre de cisaillement correspond au centre de gravité des inerties



Figure 23 : Exemples de formes favorables. La présence de plusieurs axes de symétrie assure la régularité et la compacité

Plus un plan est compact, davantage il sera stable. Ceci signifie qu'une forme carrée est mieux par rapport à une forme rectangulaire et de même, une forme circulaire sera la plus favorable en absolu.

Si les nécessités fonctionnelles empêchent le choix d'une forme simple il est bien de procéder par le fractionnement d'une forme complexe en plusieurs formes compactes. Le lien entre ces éléments se fait généralement par des joints parasismiques. Ceux-ci doivent être assez larges pour éviter que les éléments n'entrent pas en collision. Ce choix permet d'éliminer les excentricités entre le centre de gravité et de cisaillement car ils seront considérés à l'échelle des éléments singuliers. Une construction en « L » est par exemple peu stable. Dans ce cas de la meilleure solution c'est de la séparer en deux ou trois éléments. Le même raisonnement intéresse des formes de construction en « T » et en « C ».

La répartition des efforts dans une structure va se faire à prorata des rigidités. Les éléments les plus rigides mobiliseront plus d'efforts pour atteindre les mêmes déformations que les éléments plus souples. Il faut donc éviter des hauteurs d'étages irrégulières car les sollicitations se concentreront dans les éléments les plus courts. Comme on a déjà dit dans le cadre de la construction en terre il faut éviter des hauteurs trop importantes pour ne pas atteindre les fréquences critiques et donc ce critère ne pose pas trop de soucis.

La qualité d'une construction face aux séismes peut être représentée par la formule suivante :

$$\boxed{\text{Qualité structurale} = \text{résistance} * \text{ductilité}} \quad (\text{Grohmann, 1998})$$

Plus la résistance d'une structure est faible et plus elle doit être flexible afin de résister.

7. Adobe

La technique de l'adobe est très diffusée dans la construction en terre crue. Souvent, lors d'un tremblement de terre, les zones bâties en adobe sont les plus touchées et celles où on registre le plus grand nombre de victimes. En Chile la région de Maule a subi les dégâts les plus importants lors du séisme du 27 février 2010 (magnitude 8.8). Là-bas, les constructions en adobe sont partout. Un exemple précieux et significatif de l'art colonial c'était l'église « Inmaculada Concepción » de la Campaña, érigée avec la technique de l'adobe en 1758 par les Jésuites. Cette église a été complètement détruite par le séisme (figure 24).



Figure 24 : Eglise « Inmaculada Concepcion », la Campaño (Chile), avant et après le séisme du 27.02.2010

Même si on revient au séisme du 17 mai 1970 en Pérou, on voit que la majorité des zones gravement touchées étaient bâties en adobe. Cependant, certaines maisons ont résisté mieux que d'autres. Ceci montre qu'en respectant des conditions de construction particulières, les structures en briques crues peuvent arriver à se comporter de manière convenable face aux sollicitations multiples produites par un séisme.

Cette technique nécessite donc des solutions efficaces. Il faut analyser quels sont les facteurs déterminants qui peuvent améliorer la réponse et le comportement d'un bâtiment en adobe, afin d'éviter la ruine complète de la structure soumise à des secousses.

7.1 La brique

Premièrement c'est fondamental de regarder l'élément base de la technique : la brique en terre crue. Le dimensionnement et la composition de la brique jouent en effet un rôle très important. Des essais conduits par CRATerre ont montré qu'une brique de forme carrée a une résistance mécanique supérieure face au séisme par rapport à une brique rectangulaire. Dans ce sens, des bonnes dimensions à choisir sont : 30x30x10 cm.

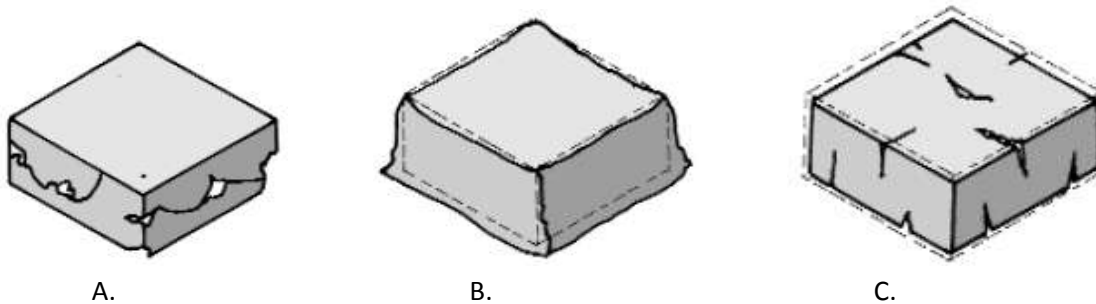
La composition optimale qui permet d'obtenir un adobe de haut qualité résulte d'un bon mélange entre terre argileuse, terre sableuse, paille et eau. Pour ce qui concerne la terre argileuse, la chose la plus importante c'est de vérifier qu'elle ne contienne pas de matière organique. Des particules de ce type peuvent en effet porter à la détérioration du matériau qui compose la brique et conduire à une chute de la résistance. Dans le mélange, on utilisera un volume de terre argileuse, tandis que l'équivalent de trois de terre sableuse. Le volume paille correspond à dix volumes de terre. Avant de l'introduire on doit s'assurer qu'elle soit bien sèche. En alternative on peut aussi utiliser des autres fibres végétales. L'eau à mélanger doit être égal au 30% du volume sec final de terre et également exempt de matière organique.

En récapitulant, le bon rapport de terre pour obtenir une brique idéale est : 1x argileuse et 3x sableuse. En suite il faut ajouter la paille : 10x volume de terre et l'eau : 0.3x volume de terre (Carazas, s.d.).

Nous remarquons que ce n'est pas facile d'avoir partout à disposition ces différents types de terre. Dans la majorité des cas la terre employée est directement celle qu'on trouve sur le site.

Clairement les briques doivent être fabriquées de manière avisée afin d'éviter tout défauts et pour qu'ils maintiennent la forme idéale.

Les défauts plus courants qui peuvent survenir lors du démoulage et après avec le séchage sont :



- A. Vides dans les angles à cause d'un mauvais remplissage du moule ;
- B. Augmentation de la base à cause d'une quantité d'eau trop élevée ;
- C. Fissures de retrait → protéger du soleil pendant le séchage.

(Carazas, *s.d.*)

Toutes les imperfections comportent une perte de résistance mécanique.

7.2 Mise en place

Afin de garantir une transmission optimale des efforts, l'arrangement des briques est très important. Surtout dans une disposition en panerresse on nécessite une certaine rigueur (*figure 25*). Cette disposition classique nécessite en outre l'utilisation des demi-briques. Les adobes doivent être parfaitement alignés. Dans le sens vertical, un contrôle rapide et efficace est possible grâce l'utilisation du fil à plomb.

Il faut prêter aussi beaucoup d'attention à la disposition du mortier entre les briques. En effet, le rôle du mortier est vital : il est un élément de liaison qui sert à garantir une bonne répartition des efforts dans le mur. Sans une répartition uniforme, des endroits seront plus sollicités que d'autres et de conséquence certaines briques se casseront plus facilement. L'épaisseur de la couche doit donc être suffisant (au minimum 2 cm). Le mortier doit arriver à remplir tous les espaces entre les briques dans les deux sens principaux (*figure 26*).

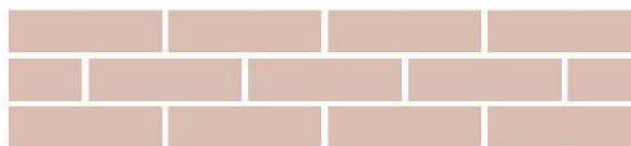


Figure 25 : Disposition en panerresse des briques en terre crue

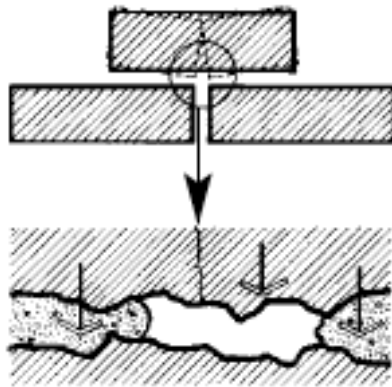


Figure 26 : Vide qui dérive d'une mauvaise disposition du mortier (Carazas, s.d.)

De même, une quantité excessive de mortier est défavorable. Le mortier est en effet le point faible du mur. Pour mieux rendre l'idée on peut faire une simple comparaison avec la maçonnerie. En testant trois briques l'une sur l'autre à la compression, la première fois avec des couches de mortier entre les briques et la deuxième sans mortier, on voit que dans ce dernier cas la résistance est presque le double. Cela s'explique par le fait que le mortier et les briques ont un coefficient de poisson ν (qui décrit la déformation latérale) différent. Le mortier empêche la déformation des briques qui se fissurent et donc leur résistance est réduite. Le mortier est nécessaire pour éviter la concentration des contraintes, mais l'épaisseur de la couche doit donc être limitée (2 cm).

L'emploi de ciment augmente les performances d'un mortier. En utilisant un mortier de terre et 15% de ciment produit une augmentation à la traction de 2.5 fois. Pour la réponse aux séismes elle est donc une bonne solution. Le problème vient du fait que le ciment n'est pas facile à repérer et il est plutôt cher. De plus il faut éviter un mortier entièrement en ciment car il serait trop rigide par rapport aux briques qui se fissureraient à cause de l'impossibilité de se déformer aux extrémités.

7.3 Conception de la structure

Comme anticipé précédemment, au niveau de la conception c'est importante de respecter quelque condition de base. Premièrement le bâtiment doit avoir seulement un niveau et ne doit pas dépasser une hauteur de 3 m. Les charges restent alors petites et la structure est plus compacte. La construction doit forcément être bien proportionnée et équilibrée aussi dans le plan horizontal : des maisons trop longues sont aussi déconseillées.

Une autre règle c'est d'éviter des formes en « L », « T » et « C » pour n'avoir pas des endroits défavorables où les sollicitations se concentrent.

Comme pour tous les matériaux, les murs en adobe doivent être bien dimensionnés. Il faut notamment limiter le rapport hauteur/épaisseur pour que la structure soit davantage stable. Concernant les ouvertures dans les murs, elles ne doivent pas se trouver proche des angles (1 m de marge sa suffit). La détérioration de la construction lors d'un séisme sera majeure si les ouvertures sont trop nombreuses ou trop étendue dans un seul mur. Dans ce cas la limite du rapport vides/pleins est 1/3.

Une solution élégante et efficace pour augmenter la résistance des murs face aux séismes est de constituer des contreforts dans les coins (*figure 27*). Ces contreforts servent à contenir les effets d'une charge de poussée et soutiennent mieux le mur. Normalement ils sont appliqués aux grands bâtiments tels que les cathédrales. Dans l'échelle d'une maison en terre crue ils sont faciles à constituer et est donc fortement conseillés vu l'apport qu'ils donnent.

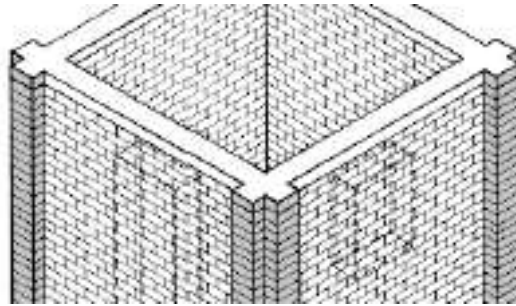


Figure 27 : Contreforts dans les coins qui permettent d'augmenter la stabilité des murs ; on voit aussi le chaînage au but des murs (Carazas, s.d.)

Un toit léger pour la maison est préférable. La répartition du poids uniforme garantit une résistance supérieure. Comme recouvrement du toit, CRATerre propose des tuiles en microbéton. Ce matériau est sans doute favorable à une construction de ce genre mais probablement n'est pas du tout facile à repérer. Un toit en paille est une bonne solution.

Remarque : Le choix de la toiture idéale est lié à plusieurs critères. Premièrement le climat local et les matériaux disponibles. En effet pour les séismes la toiture légère est la plus adaptée, mais cela peut être défavorable pour les pressions du vent, donc il est important de bien connaître les principaux dangers dans une région.

Les dimensions idéales pour un maison parasismique sont données dans le schéma suivant (*figure 28*) :

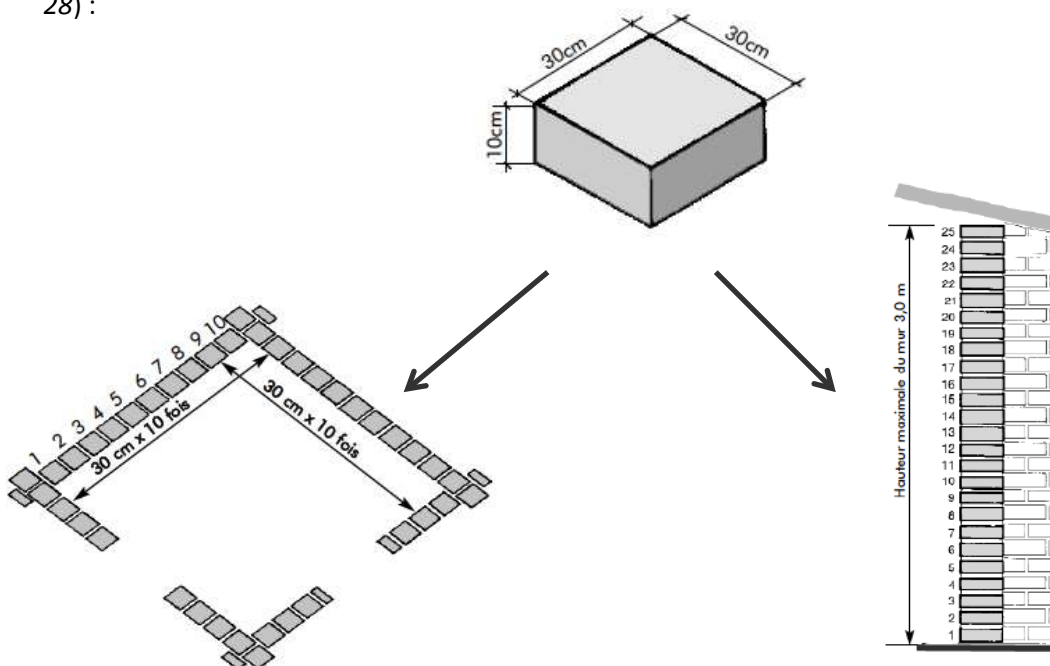


Figure 28 : Dimensions idéales de la brique et de la pièce (Carazas, s.d.)

La longueur maximale du mur est dix fois la dimension de la brique ; il faut ajouter l'épaisseur des couches de mortier :

$$30 [cm] \cdot 10 + 2 [cm] \cdot 11 = \mathbf{3.22 [m]}$$

La hauteur maximale du mur est 25 fois la dimension de la brique ; il faut ajouter l'épaisseur des couches de mortier :

$$10 [cm] \cdot 25 + 2 [cm] \cdot 25 = \mathbf{3.00 [m]}$$

7.4 Renforcements

Dans les zones à moyen/haut risque sismique, il est nécessaire de renforcer les murs en briques de terre crue. Il y a des règles qui permettent d'augmenter beaucoup la résistance et d'améliorer ainsi le comportement de la structure face aux secousses.

Le chaînage est une solution efficace qu'on peut appliquer à une maison. Il consiste en un anneau (ou ceinture) qui est placé dans la partie supérieure du mur et entoure toute la structure. Il permet de transmettre mieux les efforts en cas de séisme puisqu'il assure la continuité entre murs transversaux, la continuité entre toiture et murs et il augmente la résistance à la flexion. Pour constituer le chaînage on pourrait faire des petites poutres en béton armé. Ce choix est cependant le plus cher. Le bois est un matériau qui se prêt bien et il est donc une alternative valide.

Afin de renforcer ultérieurement la structure il faut introduire dans les murs des renforts horizontaux et verticaux. Le bambou et des roseaux sont idéals pour ce but. Le principe est similaire à l'emploi de l'acier dans le béton armé. Les matériaux de renforcements sont en effet élastiques et résistent bien à la flexion. Ils empêchent donc que des déplacements des murs trop importants se produisent et ils augmentent la résistance aux séismes. Afin d'optimiser leur contribution et d'obtenir le maximum de la stabilité, il faut prévoir l'introduction des « barres » pendant la construction. L'emploi de demi-briques est la solution meilleure qui permet de faciliter la construction (*figure 29*).

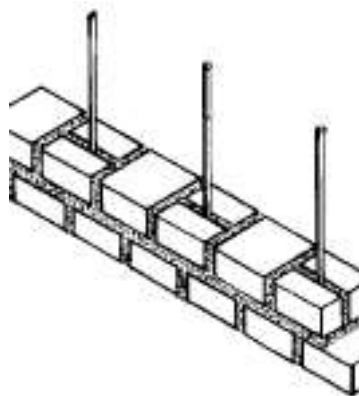


Figure 29 : Disposition des briques avec renforts verticaux (Carazas, s.d.)

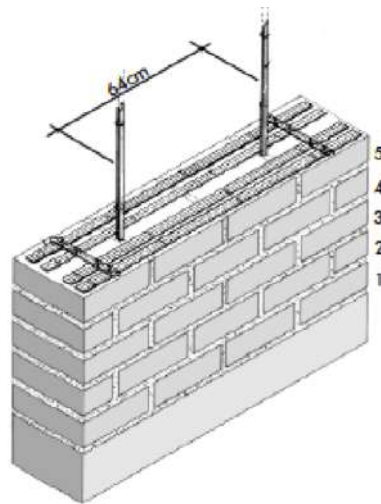


Figure 30 : Mur en adobe avec renforts verticaux e horizontaux (chaque 5 assises) (Carazas, s.d.)

Des renforcements au niveau des angles sont surement utiles, vu qu'ils constituent un point délicat de la structure. Des solutions possibles pour les stabiliser sont représentées dans l'image suivante (figure 31) :

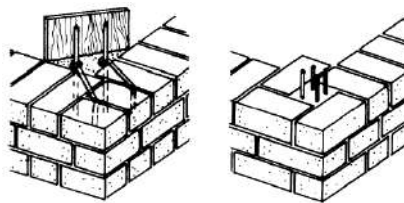


Figure 31 : Solutions pour la stabilisation des zones d'angle (Minke, 2001, p. 25)

Une autre solution efficace qui permet sans doute de stabiliser le mur c'est utilisation d'un filet métallique (figure 32) qui constituerait une armature bien répartie sur toute la surface du mur. Le souci reste sa disponibilité.

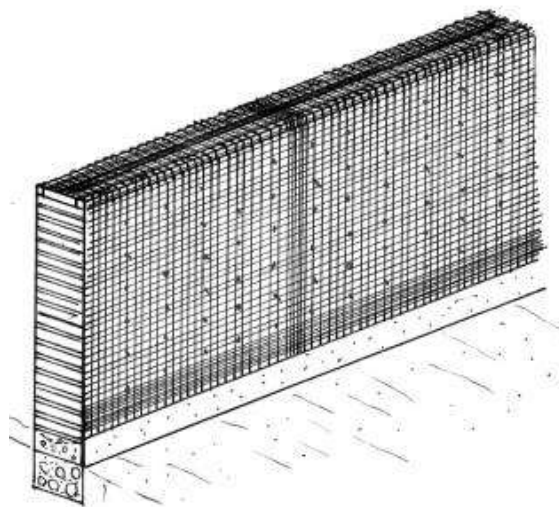


Figure 32 : Filet métallique sur un mur en adobe (Blondet et al., 2011, p. 15)

Afin de comparer le comportement d'une maison stabilisée ou pas, on peut procéder avec un test simple. En effet, si le laboratoire ne dispose pas d'outils sophistiqués pour la simulation des ondes sismiques, on peut placer la maison sur un plan incliné. On peut donc transformer l'angle par rapport à l'horizontale dans une magnitude correspondante. Un exemple est montré dans la figure suivante (figure 33) :

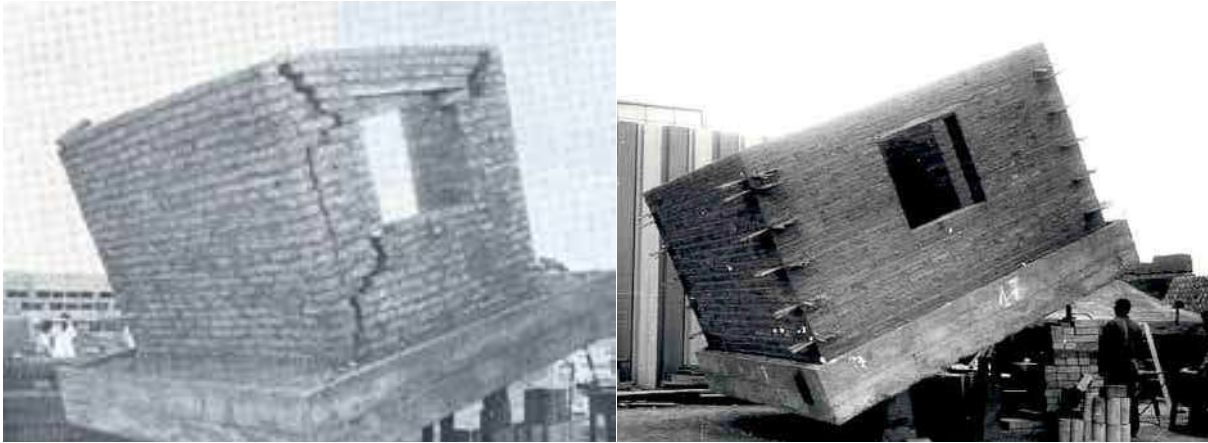


Figure 33 : Test pour mesurer les performances sismiques d'une maison en adobe sans et avec roseaux internes (Blondet et al., 2011, p. 10)

8. Torchis

La technique du torchis se différencie par rapport aux autres techniques de construction en terre crue car elle est classifiée comme construction mixte. En effet elle combine le matériau terre avec un matériau végétal comme le bois ou le bambou pour mieux exploiter les caractéristiques favorables de ces deux matériaux et de leur interaction.

Comme on a dit la terre crue est un matériau facilement repérable et a faible coût qui se prête bien pour un remplissage. Le bois par contre offre une très bonne résistance à la traction et surtout à la flexion, qui en cas de séisme se révèle déterminante.

La limitation du torchis reste probablement liée à la nécessité de repérer le bois ou le bambou et donc il n'est pas applicable n'importe où.

De plus la construction en torchis se caractérise par une certaine légèreté par rapport aux autres techniques, ce qui améliore considérablement son comportement sismique. La structure porteuse est constituée par des poutres et colonnes en bois. Donc seront ces éléments à reprendre les sollicitations engendrées par le tremblement de terre. La terre qui joue le rôle de remplissage des parois contribue à rigidifier l'ensemble de la structure mais n'a pas de fonction porteuse. La fissuration d'un mur en torchis ne met pas en danger la stabilité du bâtiment et peut être réparé facilement ou substitué sans trop de difficultés. De plus sa rupture contribue à dissiper une partie d'énergie du séisme sans constituer un danger pour les habitants.

Pour ces raisons la technique du torchis a démontré de posséder des caractéristiques mécaniques suffisantes qui lui permettent de résister de manière satisfaisante aux tremblements de terre. Cela a été confirmé par des études scientifiques et même par des séismes réels.

Les considérations sur les mesures parasismiques générales restent bien sur valables pour le torchis : donc l'emplacement, la qualité des matériaux et la forme globale de la maison sont à choisir selon les critères énoncés auparavant. De plus pour que ce comportement favorable soit vérifié il faut respecter un certain nombre de règles constructives.

Au niveau de la conception, la maison de forme cubique reste le principe de base à appliquer pour améliorer la réponse globale aux efforts. Dans le cas où des formes particulières seront nécessaires on veillera à décomposer ces dernières en formes simples.

La structure porteuse principale, constituée en bois, doit être symétrique ce qui est réalisable par quatre colonnes dans les angles du carré de base. Les colonnes doivent être chaînées en tête et à leur base pour que l'ensemble puisse travailler de façon optimale et exploiter au mieux la forme cubique.

La structure secondaire, constituée par des colonnes plus minces est aussi chaînée par des poutres aux extrémités.

Le treillis de remplissage a par contre uniquement la fonction de soutenir la terre qui va constituer les murs ; des éléments souples et peu espacés sont donc suffisants.

Le rôle fondamental dans la construction en torchis, comme dans la construction en bois en général, est constitué par les contreventements. Ceux-ci assurent la stabilité de la structure dans le plan de ses façades. Il faut donc que ces éléments soient bien dimensionnés et surtout que leurs assemblages soient soignés de manière attentive pour éviter que l'humidité favorise la dégradation du bois et l'endommagement de ces derniers. Les murs en colombage constitués uniquement par des panneaux de torchis sans contreventements sont fragiles. Cela a été constaté lors du séisme de Kobe (Japon) en 1995.

Comme dans le cas de l'adobe, la toiture doit être légère et appuyée de manière uniforme sur les murs pour éviter une concentration de contraintes.

Pour ce qui concerne les matériaux de construction utilisés il faut que le bois ou le bambou subissent un temps de séchage suffisant après leur coupe. Cela est fondamental pour la durabilité de la structure car une teneur en eau trop élevée réduit les caractéristiques du bois et favorise une fissuration irrégulière combinée avec des déformations et changements de dimensions après la mise en œuvre, qui réduisent sa résistance. De plus une humidité élevée provoque la dégradation rapide à cause d'insectes et champignons.

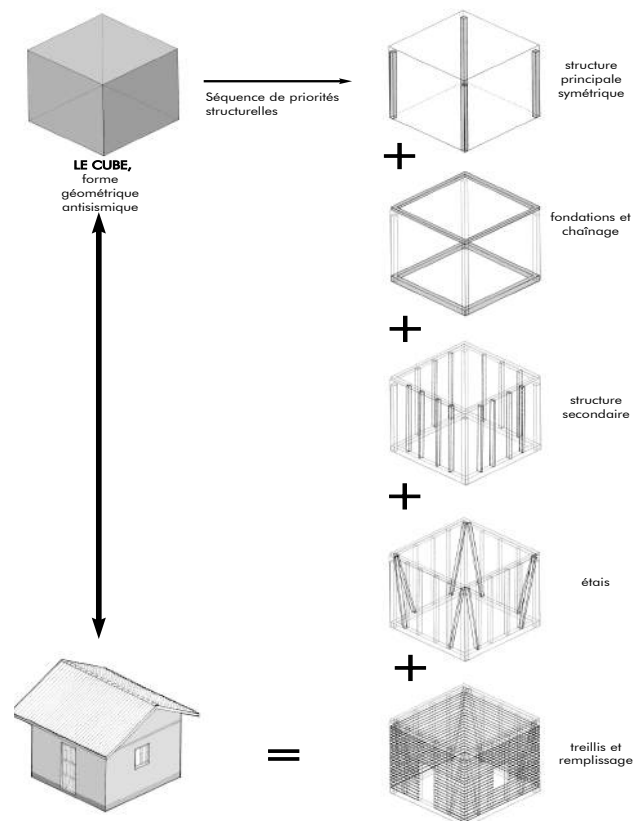


Figure 34 : Maison parasismique en torchis (Carazas et al., s.d.)

CRA-Terre a développé un système de construction pour le torchis qui est basé sur une technique ancestrale présente dans la région de Ceren au Salvador. Le but de cette recherche a été d'adapter les bases techniques de la civilisation de Ceren et de les adapter aux matériaux utilisés actuellement et surtout aux nécessités sismiques. La particularité de ce prototype est la limitation de l'utilisation du bois, qui dans certaines zones est une ressource précieuse et son utilisation extensive cause des problèmes de déforestation. Il faut se rendre compte que le bois est une ressource importante et si chez nous est facilement accessible, cela n'est pas le cas pour plusieurs régions.

L'idée de cette technique est de créer des colonnes qui ne sont pas constituées de bois. Celui-ci est remplacé par des tiges de bambou qui sont posées dans des soubassements formés par des blocs en béton creux. Les tiges sont liées entre elles par des fils souples en fer ou en matière végétale. Des étriers en bambou assurent la stabilité de l'ensemble de la colonne qui est ensuite remplie par un mortier de terre et paille pour augmenter son inertie. De plus elles seront renforcées localement par des étriers supplémentaires en acier.

Cette solution bien que favorable pour la faible utilisation du bois nécessite l'emploi du béton, qui donc n'est pas toujours repérable. De plus on imagine que la réalisation des colonnes composées par les tiges de bambou est plus délicate et surtout plus lente par rapport à la pose d'une colonne monolithique en bois et donc ne respecte pas les principes de base de l'auto-construction.

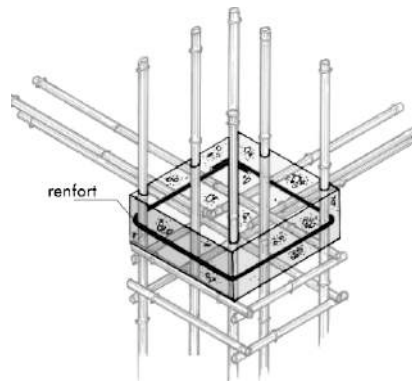


Figure 35 : Détail d'une colonne en bambou avec étriers et remplissage en mortier (Carazas et al., s.d.)

9. Fondations

Les fondations ont la fonction de transmettre les charges de la construction au terrain, elles constituent l'organe de connexion entre le sol et la structure. Elles doivent assurer une réduction des contraintes pour que celles-ci ne dépassent pas la capacité portante du sol.

Nous avons déjà mentionné l'importance du choix de l'emplacement de la structure. Un bâtiment construit selon les règles parasismiques mais placé sur un sol de mauvaise qualité subira des conséquences désastreuses.

Les fondations doivent permettre la reprise de différents types d'efforts (traction, compression, flexion) selon les actions qui agissent sur la structure (poids propre, charge utile, vent, neige, séismes,...).

Pour le cas de la construction en terre crue cela a une importance encore plus élevée car elles doivent garantir la durabilité du matériau des murs en offrant une bonne protection contre les agents d'érosion. En effet le principe clé de la construction en terre crue c'est de posséder « des bonnes bottes et un bon chapeau ». Cela est directement lié aussi à la conception parasismique car la dégradation des murs porteurs conduit à une baisse importante de la résistance et donc de la capacité de survivre aux tremblements de terre.

L'agent climatique qui menace les fondations est l'eau. Pour cela elles doivent être composées de matériaux qui ne se dissolvent pas à contact avec la pluie ou l'eau qui ruisselle sur le terrain ou dans le sous sol. Des matériaux rocheux ou du mortier stabilisé par du ciment semble être la solution la plus indiquée. Du bois aussi pourrait être utilisé à condition qu'il ne subisse pas de variation d'humidité qui accélère sa dégradation, donc en général il est préférable de l'éviter. Des fondations en briques en terre cuite sont déconseillées pour des zones sismiques car elles sont très rigides mais possèdent une faible résistance en traction et cisaillement. La disponibilité des matériaux en place, les coûts et le temps de réalisation jouent aussi un rôle dans le choix des fondations.

Le soubassement doit sortir d'au moins 20 cm du sol pour éviter que l'eau extérieure puisse contaminer la matière du mur. Cela peut se passer par l'absorption de l'humidité suite à une pluie ou en cas d'inondation (figure 36). Pour éviter ce dernier cas il faut que le niveau intérieur soit rehaussé de manière que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur. Il est raisonnable de donner une pente au terrain extérieur pour éviter l'accumulation d'eau.

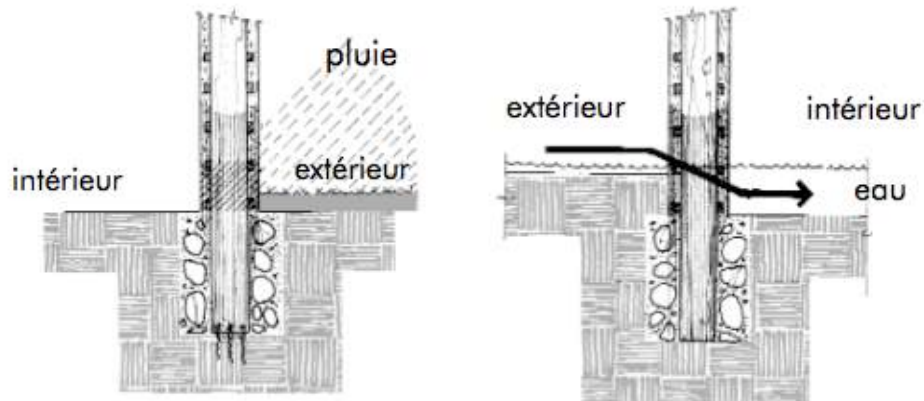


Figure 36 : Risque d'absorption et d'inondation (Carazas, s.d.)

Les fondations doivent avoir une largeur minimale de 40 cm et plus en général la largeur recommandée est de 1.5 fois la largeur du mur. La profondeur par contre dépend de la qualité du terrain en place et des charges de la structure. Elle ne devrait pas être en dessous de 20 cm.

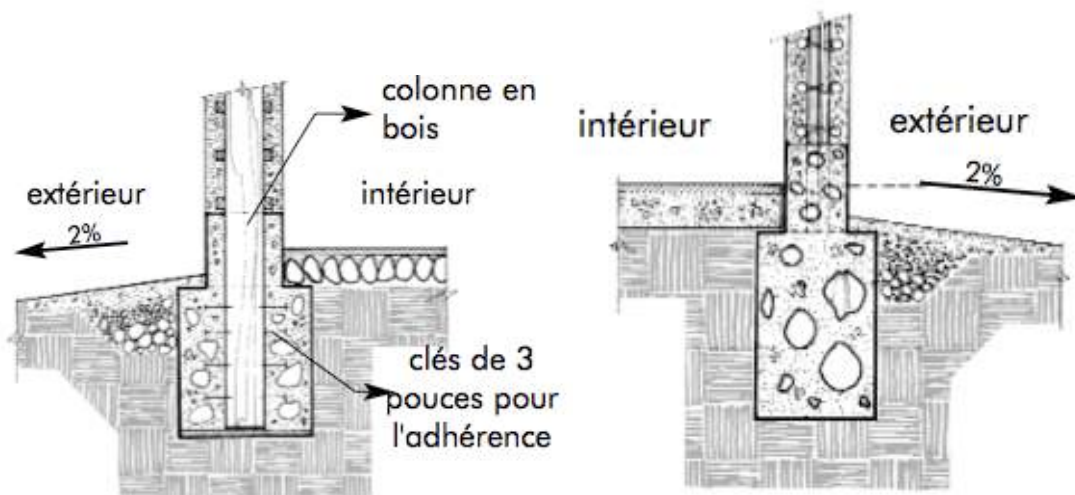


Figure 37 : Fondation avec colonne encastrée dans le béton (a). Fondation en béton cyclopéen² (b) (Carazas, s.d.)

² Béton constitué de granulats et galets qui peuvent mesurer jusqu'à 200 mm. Il est utilisé pour des ouvrages massifs qui ne demandent pas une résistance très élevée.

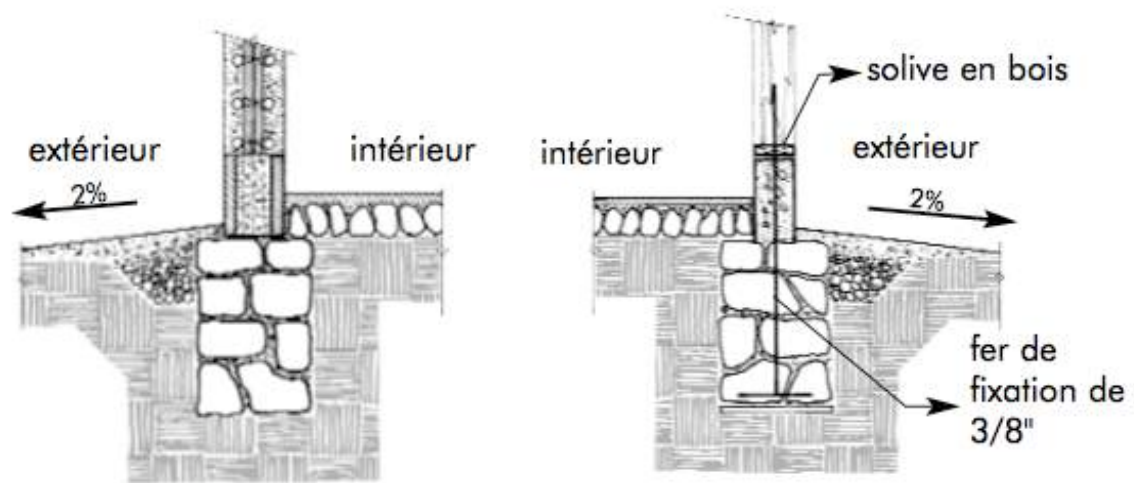


Figure 38 : Soubassement en blocs de béton remplis de béton (a). Colonne en bois liée au soubassement en béton (b) (Carazas, s.d.)

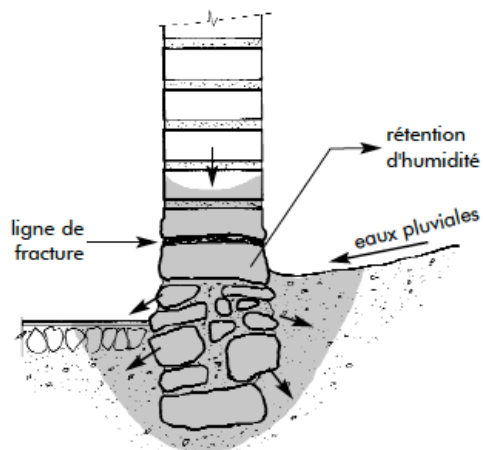


Figure 39 : Exemple de détérioration d'un fondation dans un emplacement défavorable à cause de la pente du terrain qui conduit l'humidité sur le mur (Carazas, s.d.)

10. Conclusion

Le thème de la construction en terre crue dans les zones sismiques est très délicat. En effet, la terre crue est confrontée à des préjudices. En cas de tremblement de terre, elle est souvent considérée comme la cause primaire des dégâts et du grand nombre de morts. Ses propriétés mécaniques ne sont pas adéquates à la reprise des efforts de traction engendrés par les tremblements de terre et contribuent à donner à la terre crue un sens de fragilité et d'insécurité. Les débats sur la nécessité de créer des normes ou même d'interdire l'utilisation de ce matériau dans les zones à risque persistent et ils restent très actuels.

La construction parasismique est souvent sophistiquée. Les solutions proposées sont complexes et très chères, tandis que dans le cas de la terre crue, une construction facile (pour l'auto construction) et un coût réduit sont les objectifs primaires. Le défi est donc d'obtenir quelque chose d'efficace mais qui respecte ces contraintes.

Dans le cours de son histoire, l'homme a développé un savoir-faire lié à la construction en terre crue. Avec l'apparition de nouveaux matériaux « modernes » tels que le béton et l'acier, on a perdu une partie des compétences à bâtir en terre. La recherche dans le domaine, retournée beaucoup active aujourd'hui, doit donc conduire premièrement à une redécouverte de ces techniques. Ensuite, le développement des techniques peut, avec des nouvelles solutions, aider à agrandir ultérieurement le niveau de sécurité pour les habitants.

La construction parasismique est concertée par toute une série d'éléments qu'il faut bien retenir. Le comportement final de la structure face aux séismes va dépendre des interactions entre l'ensemble de ces éléments et de l'interaction sol-structure. Il faut prêter attention que chaque partie soit efficace. Une bonne conception, ainsi qu'un bon choix du site d'emplacement sont des questions fondamentales. La composition du/des matériau/x, le soin dans la phase de construction, les fondations, etc. sont tous des discours qui doivent être analysés. L'incorporation de renforcements qui ont le but de stabiliser la structure est l'autre partie importante qui permet d'augmenter la stabilité générale. Ceci a une importance capitale dans le domaine de la terre crue. Pour ce faire, dans la construction on couple la terre avec des autres matériaux (par exemple de nature végétale). Ces autres matériaux exploités résistent bien à la traction et à la flexion, qui sont les propriétés critiques face aux sollicitations puissantes engendrées par les tremblements de terre. Par contre, il faut remarquer que la terre crue possède une certaine ductilité en compression et en cisaillement qui lui assure une certaine déformabilité avant rupture. Le couplage de la terre avec le bois s'est révélé très efficace et permet d'exploiter au mieux les propriétés des deux matériaux.

Une analyse à tous niveaux est donc indispensable. Avec des mesures pertinentes on peut donc avoir une bonne réponse même avec un matériau qu'à la base n'est pas le plus indiqué pour ce type de sollicitations. Comme on a vu tous les matériaux, y compris les plus modernes, si mal utilisés provoquent des dégâts importants en cas de séisme. Une conception soignée qui respecte les critères essentiels sur la forme générale et les dimensions de la structure, avec une attention particulière aux détails permet donc d'obtenir des résultats très satisfaisants avec des matériaux

« pauvres », peu élaborés et donc des coûts très restreints. Cela est sûrement un avantage très important qui offre la terre crue et qui pourrait se révéler la meilleure solution pour un grand nombre de régions.

La grande disponibilité et la rapidité dans la construction sont deux facteurs qui jouent à faveur de la terre crue dans la reconstruction après un séisme. De plus les coûts énergétiques, de construction et de recyclage des matériaux sont aussi très faibles qui rendent la terre crue un matériau qui a été important dans le passé et qui pourrait le devenir pour le futur.

« À une époque où toutes les possibilités offertes par l'acier ou le verre, les plastiques et autres matériaux nouveaux n'ont pas encore été réalisées ou appliquées, l'emploi adéquat des matériaux traditionnels d'une manière qui fasse plein usage de leurs propriétés, constitue une morale et un étalon applicables aux nouveaux matériaux. L'architecture vernaculaire offre une autre règle morale : l'application adéquate d'un matériau à son usage, en étendant sa portée et en exploitant sa capacité, mais sans l'obliger à se comporter contrairement à sa nature »

(P.Oliver, 1969)

Bibliographie

Bettini, N. (2010). *Il ritorno della terra cruda per l'edilizia sostenibile: la duttilità dei tamponamenti negli edifici soggetti a sisma*. Consulté le 17 mars 2012 http://eprints-phd.biblio.unitn.it/320/1/Nicola_Bettini.pdf

Blondet, M. & Villa, G. & Brzev, S. & Rubinos, A. (2011). *Earthquake-resistant construction of adobe buildings : a tutorial*. Consulté le 7 avril 2012 http://www.world-housing.net/uploads/WHETutorial_Adobe_English.pdf

Carazas, W. (année de publication non spécifiée). *Adobe : Guide de Construction Parasismique*. France : Editions CRATerre

Carazas, W. & Rivero, A. (année de publication non spécifiée). *Torchis : Guide de Construction Parasismique*. France : Editions CRATerre

Carazas, W. & Rivero, A. (2003). *Réhabilitation : Guide de Construction Parasismique*. France : Editions CRATerre

Chiodero, C. (2008). *L'habitat in terra cruda nello sviluppo rurale del nord dell'India : esperienze nella ricostruzione post-terremoto nel distretto del Kachchh*. Consulté le 17 mars 2012 www.polito.it/crd-pvs/documenti/chiodero.pdf

De Sensi, B. (2003). *Terracruda, La Diffusione Dell'architettura Di Terra*

Doat, P. & Hays, A. & Houben, H. & Matuk, S. & Vitoux, F. (1979). *Construire en Terre*. Paris : Editions Alternatives/ Collection AnArchitecture

Gargiulo, M. (2007). *Costruzioni storico monumentali in terra cruda. Proposta per un metodo di valutazione della vulnerabilità sismica e dell'adeguamento antisismico*. Consulté le 17 mars 2012 http://www.fedoa.unina.it/2818/1/Gargiulo_Conservazione_dei_Beni_Architettonici.pdf

Garnier, P. & Moles, O. & Caimi, A. & Gandreau, D. & Hofmann, M. (2011). *Aléas naturels, Catastrophes et Développement local*. France : CRATerre Editions

Lestuzzi, P. & Badoux, M. (2008). *Génie parasismique : Conception et Dimensionnement des Bâtiments*. Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes

Minke, G. (2001). *Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth*. Consulté le 17 mars 2012 <http://www2.gtz.de/dokumente/bib/04-5789.pdf>

Ostrowski, J. (2009). *Hakka Tulous*. Consulté le 28 avril 2012 www.hakkaheritage.com/files/NSF_plan.pdf

Parriaux, A. (2009). *Géologie : Bases pour l'Ingénieur*. Suisse : PPUR presses polytechniques

Plafker, G. & Ericksen, G. & Fernandez, J. (1971). *Geological aspects of the May 31, 1970, Perú earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America, June 1971

Qu, L. & He, B. (2006). *Hakka Earthen Buildings in China*. China : Haichao Photography & Arts Press