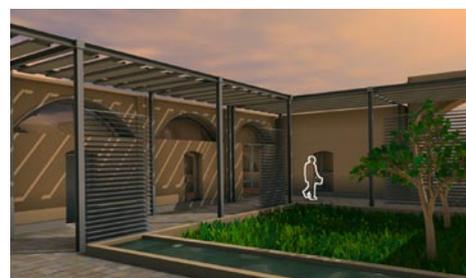
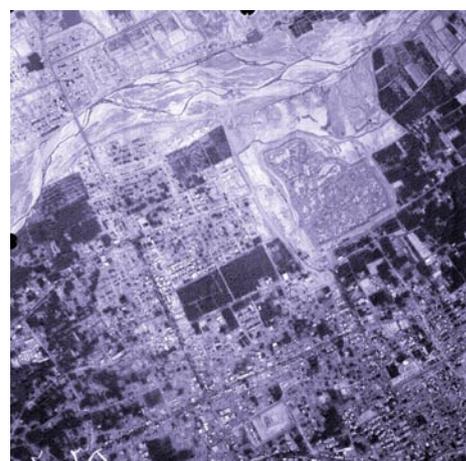


DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PARASISMIQUES DANS LA CONTINUITÉ DES CULTURES CONSTRUCTIVES A BAM

Un ensemble de bureaux et logements pour l'ICHTO comme illustration des possibilités de la filière de construction en terre pour la reconstruction de la ville de Bam



Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Matthieu DUPONT DE DINECHIN

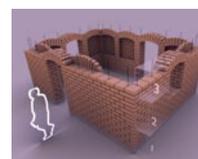
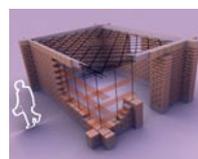
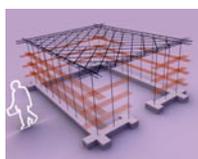
Directeur d'études : Hubert Guillaud

Second enseignant: Wilfredo Carazas-Aedo

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble - 2005

Ministère de la Culture et de la Communication

Direction de l'Architecture et du Patrimoine



Je tiens à remercier tout particulièrement ici :

Hubert Guillaud, enseignant chercheur, directeur scientifique du Laboratoire de recherche CRATerre-EAG, mon directeur d'étude,

Wilfredo Carazas-Aedo, architecte enseignant, pour le partage de son expérience sur la construction en terre parasismique et avoir accepté d'être mon second enseignant,

Les membres de mon jury:

François Fleury, enseignant chercheur à l'Ecole d'Architecture de Lyon,

Jean-Michel Perrissol, ingénieur en génie parasismique,

Milan Zacek, architecte ingénieur, chercheur au laboratoire «Ambiances bioclimatiques et construction parasismique», responsable scientifique du DPEA «Architecture parasismique» à l'Ecole d'Architecture de Marseille,

Majid Hajmirbaba, mine d'informations sur l'Iran,

David Gandreau avec qui j'ai fait mes premiers pas à Bam

Dr Eskandar Mokhtari et toute l'équipe de l'ICHTO de Bam (Maryam Nezari, Navid Moghimi, Mehdi Keramatfar, Ziba Sharafi, Miss Jafary, Azade Ezrafili, Samet Ezrahi, Adi Ahmadi, Ali Bakhordor, Miss Hadian...) pour leur accueil et leur aide durant notre mission,

Dr Tayeri, ancien responsable d'Arg-é Bam, pour le temps qu'il a accordé à répondre à mes nombreuses questions,

Le centre de documentation de CRATerre-EAG (Titane Galer),

Philippe Garnier notamment pour les recherches sur internet qu'il m'a épargnées,

Ali Zamani pour les nombreux plans et les informations sur l'histoire iranienne,

Véronique Popinet,

Et tous les autres sans qui je n'aurais pu faire ce travail...

Toutes les photos, sauf mention contraire, ont été prises par David Gandreau, Majid Hajmirbaba ou moi-même lors de notre mission à Bam.

Toutes les images de synthèse ont été réalisées grâce à Blender, logiciel open source disponible sur www.blender3d.org

Les retouches photo ont été faites à l'aide de The Gimp, logiciel open source disponible sur www.gimp.org

Ce projet de diplôme a pour point de départ la construction d'un ensemble de logements et de bureaux pour l'ICHTO (Iranian Cultural Heritage and Tourism Organisation), l'Organisation du Patrimoine et du Tourisme Iranienne, pour leur centre de Bam. Dans ce centre travaillent des employés de l'ICHTO mais aussi des personnalités de passage de la communauté scientifique internationale participant au projet de rénovation et de conservation de la citadelle d'Arg-é Bam et de ses sites associés, classés au Patrimoine Mondial de l'UNESCO.

Ce projet correspond à une demande réelle de l'ICHTO qui a fait appel à CRATerre-EAG en tant que consultant pour les aider dans la conception et la construction de cet ensemble. Ce travail consiste en une réponse personnelle à cette demande réelle. Il sera dans ce cadre orienté vers une certaine faisabilité, tout en gardant des libertés pour explorer des propositions moins réalistes quoique intéressantes face à la complexité du contexte. En effet, tout en tentant de répondre à la demande, ce projet sera prétexte à illustrer les possibilités de la construction en terre dans le processus de reconstruction de la ville, reconstruction matérielle, mais aussi économique, culturelle et sociale.

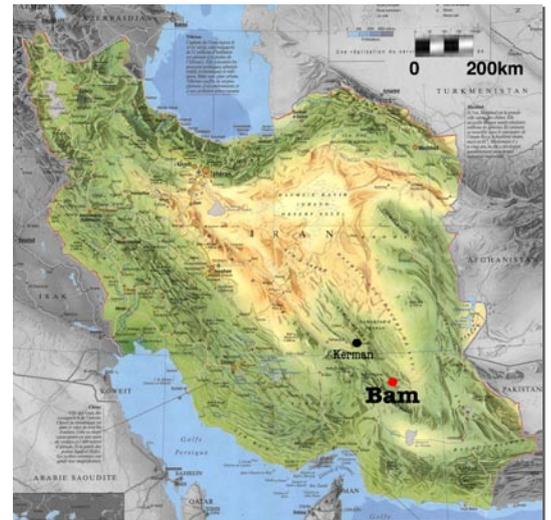
J'ai été amené à m'intéresser à ce projet à la suite du travail que j'ai effectué à Bam pour CRATerre-EAG, à savoir une mission de 6 semaines en juin et juillet 2004 pour la mise en place d'un laboratoire d'analyse des terres de construction et l'étude des cultures constructives de Bam. Cette mission avait été précédée d'un travail de préparation, notamment la rédaction d'une bibliographie sur les architectures de terre parasismique et une présentation de l'état de la science dans ce domaine, avec M. David Gandreau et M. Majid Hajmirbaba.

Contexte : la ville de Bam	2
Présentation de la ville.....	2
"L'identité de Bam" L'Arg et les Bami.....	3
Le tremblement de terre	4
La reconstruction	5
Demande	6
Les bureaux avant le tremblement de terre	6
La base-vie actuelle.....	6
Contraintes	7
La ville de Bam, risque sismique et reconstruction.....	7
La proximité de la citadelle	8

Contexte : la ville de Bam

Présentation de la ville

Bam est située aux portes du désert du Lut, à un peu plus de 1000m d'altitude. Elle fait partie de la province de Kerman, dont la capitale est située à 200 Km au nord-ouest. Son climat est continental, très sec avec quelques pluies violentes en hiver, très chaud en été et très froid en hiver.



De nombreuses légendes racontent sa naissance, mais Bam fut vraisemblablement fondée par les Parthes, qui connurent leur apogée au 1er siècle av. J-C, époque de la création de routes par lesquelles passaient les produits orientaux à destination de la Mésopotamie et de l'Empire Romain. Le commerce assura longtemps la prospérité de la ville, d'abord sous les Sassanides (224-642), et plus encore sous la dynastie des Safavides (1502-1722). Alors peuplée de plus de 5000 habitants, la principale activité, outre le commerce, y est la manufacture de textile. Après l'effondrement de la dynastie Safavide, l'empire entre dans une période de chaos durant laquelle la population iranienne passe de 40 millions à 10 millions d'habitants. Bam souffre comme le reste du pays de l'insécurité chronique et de l'instabilité politique. La dynastie des Kadjar fondée en 1796 par l'Agha Kan régnera en Iran jusqu'en 1925. L'inexorable déclin de Bam sera précipité par la malédiction de l'Agha Kan, qui se vengera en 1794 de la protection que la ville a donnée à son rival, le dernier souverain de la dynastie Zend.

En 1850, le Shah Kadjar ordonne à la population qui reste de quitter la vieille ville, la protection de la citadelle étant devenue inutile, et de s'installer le long de la palmeraie. Les militaires s'installent alors dans la citadelle qui ne sera plus habitée, et en 1920, elle est déjà totalement laissée à l'abandon. La ville nouvelle a une population estimée à une dizaine de milliers d'habitants à la fin du 19ème siècle. En 1956, un recensement dénombre quinze mille habitants, ils seront trente-quatre mille en 1976 et environ cent mille avant le séisme.

La ville est aujourd'hui concentrée au sud de la palmeraie, avec de nombreux villages s'étendant le long de celle-ci. La nouvelle ville de Barawat, située de l'autre côté de la faille au sud-est, connaissait une expansion plus rapide que celle de Bam elle-même.

Outre quelques industries, notamment automobiles, l'activité principale de la ville était avant le séisme la production de dates, réputées les meilleures du monde.



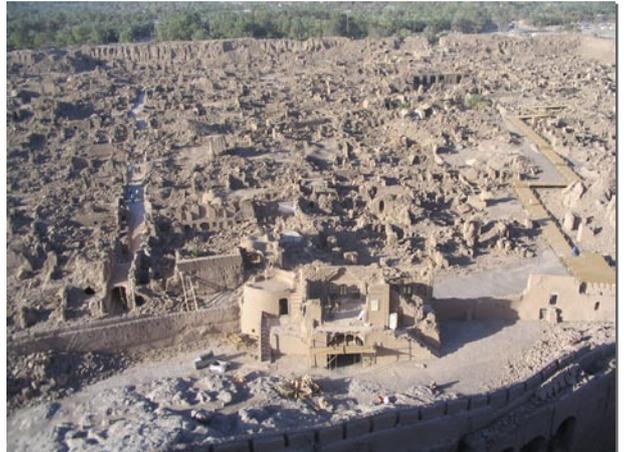
“L’identité de Bam” L’Arg et les Bami

Le spectacle de désolation que présente la citadelle dévastée prend une autre tournure les jours fériés. L’Arg est alors pleine de visiteurs, pour la plupart des Bami qui viennent revoir ce qui a été le symbole de leur ville.

En effet l’Arg fait vraiment partie de Bam, géographiquement, mais surtout dans le cœur des Bami. L’Arg, mais aussi les palmeraies, et tous les “related sites” classés maintenant sur la liste du Patrimoine Mondial de l’UNESCO.

Lorsqu’on leur demande, la plupart des habitants de la ville répondent qu’ils veulent que la citadelle soit reconstruite, qu’ils ne veulent pas perdre ce lien avec leur histoire.

Ce lien entre les habitants de Bam et leur héritage culturel a d’ailleurs été clairement mis en avant dans la Déclaration de Bam, qui parle du “rôle spirituel d’Arg-é Bam dans la vie des citoyens de Bam” et établit que “la mise en œuvre de la conservation du patrimoine de Bam est une part indissociable du processus de reconstruction et du développement durable de Bam après le tremblement de terre”¹.



1 - UNESCO, ICHO, ICOMOS Bam Declaration and Recommendations, Arg-e Bam shall always remain alive / Téhéran 2004

Le tremblement de terre

Les caractéristiques du tremblement de terre qui a frappé Bam le 26 décembre 2003 à 5h25 du matin sont les suivantes:

Magnitude: 6.6 sur l'échelle de Richter.

Intensité: IX

Accélération horizontale maximale: 0.8g

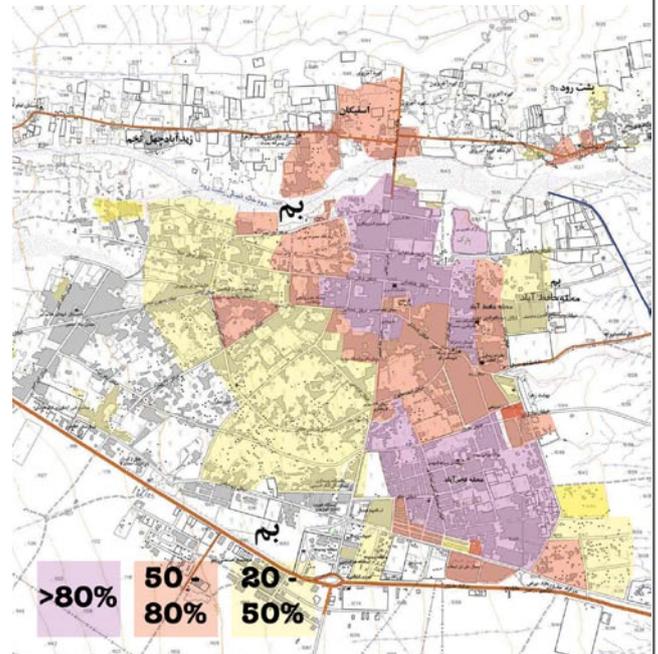
Accélération verticale maximale: 1.01g

Durée: 28 secondes

Durée effective: 10 secondes.

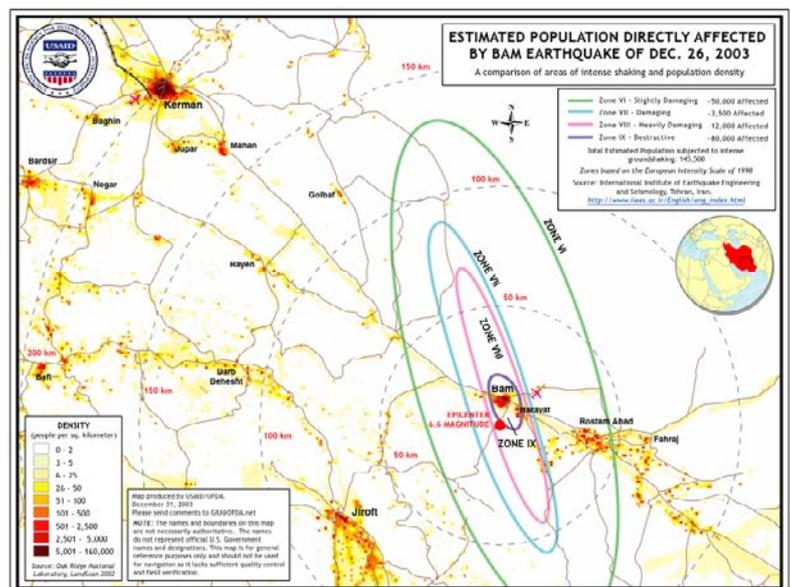
La nature du sol (sédiments meubles) a encore aggravé l'effet dévastateur.

Victimes: 37 000 morts (les estimations varient), 15 000 blessés et plus de 200 000 sinistrés.



Carte d'évaluation du pourcentage des dommages aux constructions à partir des photos aériennes (Iranian National Cartographic Center)

Les dégâts ont principalement touchés Bam, très proche de l'épicentre mais aussi de nombreux villages alentour (carte USAID).



La reconstruction

L'IHF (Islamic Housing Foundation) est l'organisme étatique en charge de la reconstruction des logements dans la ville. La période de réponse aux besoins urgents est maintenant terminée, avec notamment le rétablissement des réseaux et la construction de 35 000 logements provisoires. La période de reconstruction des logements définitifs a commencé, mais la très grande complexité du processus en retarde toujours le début effectif.

Pour résumer rapidement, le processus est le suivant: L'IHF a fait appel à des entreprises et consultants sélectionnés aux niveaux national et international pour proposer des prototypes de logements pour la reconstruction.

Les prototypes sont construits sur un terrain fourni par IHF.

Les habitants de Bam propriétaires d'un logement détruit par le tremblement de terre choisissent un des prototypes.

L'IHF finance la reconstruction du logement par les entreprises sélectionnées à hauteur de 4500 U.S.\$ sous forme de don et à hauteur de 3500 U.S.\$ sous forme de prêt à un taux très bas pour l'Iran (4,5%).

Tout le processus de reconstruction se déroule dans le cadre du Master Plan d'urbanisme réévalué par le Ministère du Logement et la Municipalité de Bam. La reconstruction des infrastructures publiques incombe aux différents ministères dont elles dépendent, la plupart du temps à leur ancien emplacement.



Demande

L'ICHTO (Iranian Cultural Heritage and Tourism Organisation) est l'organisme gouvernemental en charge des monuments historiques en Iran. Il est donc responsable de tout ce qui concerne Arg-é Bam, les sites associés mais aussi la zone tampon (buffer zone) qui entoure les sites historiques. Ils travaillent notamment avec la communauté internationale sur les délicates questions de l'avenir de la citadelle.

Les bureaux avant le tremblement de terre

La maison Sistani avait été restaurée en 1994 et servait depuis comme bureaux. On y trouvait sur 900 m² environ:

- o Bureau du secrétariat,
- o Bureau de la comptabilité,
- o Bureau de la direction,
- o Petit laboratoire,
- o Salle de conférences,
- o Salle d'archives,
- o Sanitaires,
- o Salle de stockage,
- o Bureau des services techniques,
- o Chambre pour les invités,

En outre, l'ICHTO disposait dans la citadelle de nombreux bâtiments restaurés qui servaient pour le logement des personnalités de passage ou pour le stockage de matériel.



La base-vie actuelle

Le tremblement de terre ayant complètement détruit ou rendu inutilisables les installations d'ICHTO, leurs employés travaillent et logent maintenant dans des préfabriqués à savoir (en 2004):

- o Un préfabriqué servant de bureaux à l'ensemble des chercheurs,
- o Un préfabriqué pour le laboratoire d'analyse des terres,
- o Un préfabriqué pour la bibliothèque,
- o Sept préfabriqués pour 14 logements.
- o Un ancien restaurant ayant résisté au séisme comprenant les cuisines, le secrétariat, la comptabilité et une salle servant de réfectoire et de salle de réunions.



Les conditions de travail et de vie sont assez difficiles dans ce contexte. Il a donc été décidé de construire en priorité une base-vie pour permettre aux employés permanents et aux personnes de passage de vivre et de travailler dans les meilleures conditions possibles.

La reconstruction des bureaux dans l'enceinte de la citadelle se heurtant aux problèmes liés à la restauration et à la conservation du site, cette base-vie doit s'implanter à proximité de celle-ci, sur un terrain que l'ICHTO est en train d'acheter. Cependant, la possibilité de reconstruire des bureaux sur ce terrain si proche de la citadelle n'est pas clairement établie, et l'implantation risque donc d'être différente.



Contraintes

Au sein du contexte décrit ci-dessus, certaines contraintes auront une influence directe et inévitable sur le projet. C'est pourquoi elles sont présentées rapidement ici, leur intégration au projet lui-même étant expliquée par la suite.

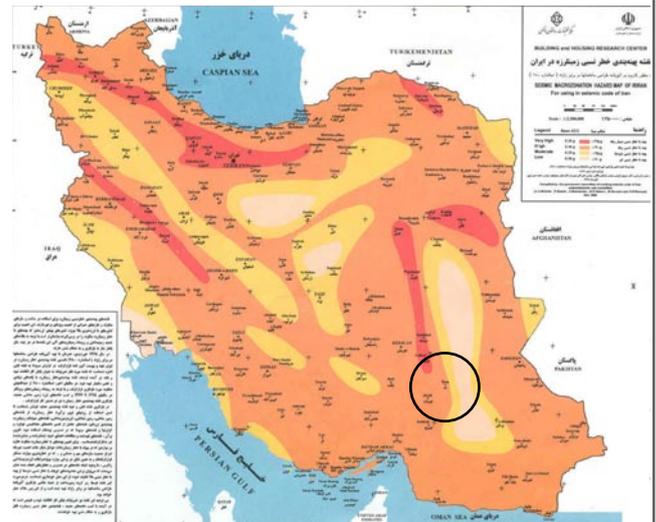
La ville de Bam, risque sismique et reconstruction

Le risque sismique

Bam est situé en zone sismique classée à haut risque par le BHRC (Building and Housing Research Center), le classement allant jusqu'à "très haut risque".

Aucun autre tremblement de terre n'a été enregistré dans l'histoire de Bam. Cependant, quatre tremblements de terre de forte amplitude ont été enregistrés ces dernières années dans le nord-ouest de Bam.

Il est bien sûr inutile de tergiverser sur les probabilités d'un autre tremblement de terre à Bam. Toutes les nouvelles constructions devraient être parasismiques. L'Iran possède des normes de construction parasismique qu'il est obligatoire, sauf exceptions, de respecter. Ce point sera abordé plus longuement en paragraphe II.2.



L'intégration dans le processus de reconstruction

Bam est une ville en reconstruction. Ce processus n'en est qu'à ses débuts. Il est évident que ce projet doit s'y intégrer dans ce processus, et ce sur plusieurs plans:

- o Urbain : Le master plan d'urbanisme a déjà été arrêté par les autorités mais reste très controversé.
- o Economique : Le projet ne peut se considérer comme un point isolé des réalités de la ville que sont notamment le manque d'emplois et la ruine de l'économie locale.
- o Social : L'acte de bâtir ayant des répercussions sur tout le tissu social actuel et futur, le projet doit s'intégrer dans la reconstruction de ce tissu qui a été durement affecté par le tremblement de terre.
- o Culturel : La conservation de l'identité culturelle de Bam étant reconnue comme un aspect indispensable du processus de reconstruction, le projet doit y participer.
- o Ecologique : ce point peut paraître secondaire face aux autres priorités. Il prend son importance étant donné l'échelle de la reconstruction (au moins 40 000 logements) et sa rapidité.

La proximité de la citadelle

Comme nous l'avons évoqué plus haut, l'intégration du patrimoine dans le processus de reconstruction est nécessaire entre autres à la conservation de l'identité de la ville. Dans la zone tampon, définissant un périmètre autour des différents monuments historiques, cette intégration est une obligation contrôlée par l'ICHTO. L'enjeu est en effet le classement sur la liste du Patrimoine Mondial de l'UNESCO, qui pourrait être remis en question si le site était jugé dénaturé par certaines constructions. Ces obligations ne sont cependant pas rédigées de manière précise sous forme d'un code par exemple.

Le site supposé du projet se trouvant non seulement dans la zone tampon, mais surtout à proximité immédiate de la citadelle et en lien visuel avec elle, la prise en compte de cette influence et de l'héritage culturel de la ville est une condition sine qua non à sa faisabilité.

Enfin, un point extrêmement intéressant dans le cadre de ce travail est l'ouverture par les autorités de la possibilité d'utiliser la terre pour les constructions dans la zone tampon.



L'Iran est un des pays les plus vulnérables au risque sismique. La carte de répartition des risques sismiques du BHRC montre en effet que 83% des iraniens vivent dans des zones à haut risque sismique. Par ailleurs, 85% des habitations iraniennes sont construites avec des matériaux (notamment la terre) considérées officiellement comme inadaptées aux constructions en zone sismique et donc interdites par les normes de construction¹.

Plus de trente mille logements doivent être reconstruits à Bam. La ville est sinistrée d'un point de vue économique et social. L'histoire et la culture de la ville de Bam sont indissociables de sa citadelle, exemple impressionnant des possibilités de la terre comme matériau de construction, mais aujourd'hui entièrement détruite.

Reconstruire Bam représente de nombreux enjeux et de nombreuses difficultés que l'on peut séparer en trois composantes:

- technique,
- culturelle,
- socio-économique.

La construction en terre, bien que les normes de construction parasismiques iraniennes en interdisent l'usage, peut permettre une réponse réaliste et durable à la catastrophe qu'a connue la ville, mais que pourraient connaître de très nombreux autres établissements humains, en Iran ou ailleurs.

I.1 Composante technique : la construction en terre et le risque sismique ... 10

- I.1.1 Le matériau n'est pas le responsable10
- I.1.2 Les normes parasismiques: application aux principes constructifs traditionnels11
- I.1.3 Les enjeux derrière les normes13

I.2 Composante culturelle: sauvegarder l'identité de Bam 14

I.3 Composante Socio-économique: reconstruire la société 16

- I.3.1 Comment et pour qui reconstruire ? Enjeux socio-économiques16
- I.3.2 Un développement durable.....17
- I.3.3 La (re)création d'une filière de construction en terre18

I.1 Composante technique : la construction en terre et le risque sismique

I.1.1 Le matériau n'est pas le responsable

Suite au tremblement de terre de Bam, on a pu très fréquemment entendre dans les médias français des allusions au fait que le matériau terre était responsable de la destruction généralisée de la ville, qui se serait "écroulée comme un château de cartes". L'amalgame était d'ailleurs assez courant entre la ville de Bam et la citadelle Arg-é-Bam qui n'était plus habitée ni entretenue depuis plusieurs dizaines d'années. Cette affirmation que le matériau de construction est le principal responsable de la faible résistance des bâtiments aux séismes est courante, et l'on a entendu le même genre de commentaires sur de nombreux autres tremblements de terre, que ce soit en Iran ou en Algérie plus récemment.

La terre comme matériau de construction, qui possède de manière générale une mauvaise image, est ainsi pointée du doigt comme intrinsèquement faible. Comme nous le verrons ci-après, la résistance d'un bâtiment ne dépend pas seulement du matériau de construction. La terre, bien que d'une résistance inférieure en compression et en traction aux matériaux dits «standard» comme le béton, peut être mise en œuvre en contexte sismique avec de très bons résultats. Les exemples de bâtiments en terre ayant résisté à des séismes sont très nombreux, et les photos ci-dessous montrent des bâtiments modernes et traditionnels à Bam, ayant résisté ou non.



I.1.2 Les normes parasismiques: application aux principes constructifs traditionnels

Cependant, dans de très nombreux pays comme en Iran, la construction en terre dans les zones présentant des risques sismiques est interdite ou rendue impossible par des normes inadaptées. Avant même d'aborder les intérêts de la construction en terre, il s'agit de comprendre pourquoi il est pratiquement impossible de construire en terre aujourd'hui à Bam.

Dans la plupart des pays, la construction est soumise à un ensemble de règles qui définissent un cadre légal. Ces règles peuvent avoir un caractère obligatoire ou servir de référence pour assurer un certain niveau de qualité des édifices et permettre des contrôles et éventuellement des recours. Le caractère obligatoire est en général appliqué aux édifices accueillant du public ou dans des situations de risques particulières comme en zone sismique par exemple.

Les normes de construction parasismique sont souvent vues comme la solution la plus efficace pour réduire les risques. Elles consistent en général en un cadre réglementaire définissant les obligations pour les constructions nouvelles, avec trois types d'indications:

- o Recommandations pour la conception d'ensemble,
- o Dispositions constructives générales et particulières à divers matériaux ou procédés de construction,
- o Règles de calcul.

Un point très important quant aux codes parasismiques est leur caractère probabiliste et statistique. Ils n'ont en effet pas pour but de garantir la sécurité de chaque bâtiment considéré individuellement, mais recherchent un résultat global au niveau de l'ensemble des constructions implantées sur un territoire qu'ils entendent protéger contre un séisme de référence. Ceci entraîne certains choix arbitraires de normes¹.

Ce point est souvent évoqué vis-à-vis du pourcentage de bâtiments qui subira des séismes plus forts que celui de référence. Cette limitation statistique des codes peut s'appliquer aussi aux modes de construction. Les constructions de type "moderne", généralement en acier et béton armé, sont considérées comme les plus employées dans les nouvelles constructions, et les codes, sauf rares exceptions, ne sont conçus que pour ces matériaux. Si ces considérations sont statistiquement réalistes quoique limitatives en Europe, le cas est bien différent en Iran comme dans énormément d'autres pays du monde, où l'on construit encore beaucoup à l'aide de techniques "traditionnelles", comme la maçonnerie ou la terre crue. Cela concerne même la majorité de la population habitant en zone à risque sismique.

On peut évoquer des situations assez typiques de ces contextes:

- o Les populations n'ont simplement pas les moyens de construire avec les matériaux préconisés dans les normes,
- o Le coût des matériaux préconisés étant en général plus élevé que celui des matériaux traditionnels, des économies sont faites sur ceux-ci, en réduisant leurs quantités (par exemple : % de ciment, section des aciers), et donc la qualité des constructions,
- o Les techniques préconisées dans les normes ne sont pas maîtrisées par les entreprises locales (par exemple: conditions de cure des bétons, qualité des maçonneries et des soudures), et les contrôles de qualité ne sont pas faits.

On en arrive ainsi à des situations où l'imposition des normes peut avoir l'effet inverse de celui escompté, alors que des solutions traditionnelles interdites par les normes ont prouvé leur efficacité.

Pour pouvoir utiliser la terre dans les constructions dans le cadre réglementaire, on peut tenter d'adapter les principes constructifs aux normes. Ceci a bien sûr l'avantage d'être effectif à court terme et de permettre de réintroduire les matériaux traditionnels dans les circuits de construction. Par contre, cela implique en général de ne pas utiliser le matériau pour ses qualités réelles, avec souvent des problèmes de surcoûts, et un usage éloigné de la culture constructive locale. On arrive parfois à un usage des matériaux à l'opposé de leurs caractéristiques.

On peut citer comme exemple l'utilisation de maçonnerie en terre renforcée par une structure en béton armé conçue de manière habituelle. Le retrait inévitable lors du séchage des adobes se traduit en général par une désolidarisation de la structure et des adobes qui entraîne une inadéquation des calculs¹.

Dans le même ordre d'idée, l'utilisation de tirants en acier pour renforcer les arcs et les voûtes est souvent préconisée. De nombreux bâtiments de la citadelle ont été renforcés ainsi, les tirants maintenant les murs à l'aide de croix métalliques. Ce type de renfort entraîne de fortes concentrations de contrainte qui peuvent dépasser la faible résistance des adobes.

On voit dans les photos ci-dessous le renforcement à l'aide d'une structure métallique d'une voûte de la maison Ameri à Bam. Il est impossible de dire si cela a renforcé la construction ou a entraîné son effondrement.



Les codes UBC aux Etats-Unis prescrivent que la section des aciers de renforcements dans un mur doit être proportionnelle à son épaisseur. Ainsi, un mur ayant un faible élancement devra être plus renforcé qu'un mur ayant un élancement plus élevé, ce qui est contraire à la logique¹.

De nombreux principes constructifs traditionnels ayant prouvé leur efficacité face au risque sismique, et ces techniques étant souvent les seules utilisables par les populations, il paraît bien sûr intéressant de les inclure dans les normes parasismiques. Ce processus est malheureusement long et l'on trouve peu d'exemples de réussite. Il se heurte en effet à de nombreux obstacles dont les suivants:

- L'absence de formation sur les matériaux traditionnels implique que les personnes en charge de la rédaction ou de la révision des normes n'ont pas les compétences nécessaires pour adapter ces mêmes normes dans cette direction.

- La "non-standardisation" intrinsèque de bon nombre de matériaux et techniques traditionnels rend beaucoup plus difficile la rédaction de normes et justement de standards qui soient reproductibles et donc contrôlables.

- L'absence d'intérêts commerciaux pour les matériaux traditionnels entraîne l'absence de moyens pour effectuer les recherches et essais nécessaires à la rédaction de nouvelles normes.

Cependant on peut citer la norme péruvienne "Norma Adobe E-080" sur la construction en adobe parasismique parue en 2000, les UBC (Uniform Building Codes) aux Etats-Unis qui comportent certaines recommandations sur la construction en adobe (la plupart datant des années 30) ou le standard indien «Improving Earthquake Resistance of Earthen Buildings-Guidelines» publié en 1993 (et modifié en 1998).

I.1.3 Les enjeux derrière les normes

Les enjeux sont tout simplement à terme la disparition d'un ensemble de pratiques et de techniques dans toutes les régions du monde où l'on se trouve confronté à un risque sismique. Sans être alarmiste, on ne peut que constater que c'est la direction générale prise aujourd'hui. Les conséquences de ces disparitions sont évoquées dans les deux parties suivantes. A plus court terme, cela signifie qu'une bonne partie des populations soumises à ce risque sont mises à l'écart du secteur de construction officiel.

La position des autorités iraniennes par rapport à la construction en terre en zone parasismique peut avoir sur cette tendance une grande importance. En effet, la catastrophe de Bam a été très médiatisée, ce qui donne un certain impact à tout événement pouvant s'y dérouler. La nomination d'Arg-é Bam et de ses sites associés à la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO augmente encore ce fait, en plus de fixer beaucoup de contraintes au niveau des constructions dans une bonne partie de la ville.

La quantité de bâtiments à reconstruire permettrait de donner un crédit inestimable à la construction en terre parasismique au cas où même une petite partie de la ville était construite suivant ces techniques. Bam pourrait devenir un champ d'investigation et d'expérimentation sans égal.

Un premier pas est déjà fait, la Fondation Islamique de l'Habitat laissant la porte ouverte au matériau terre dans le processus de reconstruction. La concrétisation de ce premier pas reste encore à venir, mais le fait que les autorités locales et une partie de la population soient conscientes de l'intérêt de construire en terre permet de rester optimiste.

I.2 Composante culturelle: sauvegarder l'identité de Bam

Il y a quelques dizaines d'années à peine, la majorité des bâtiments à Bam étaient construits en terre, avec des voûtes et des coupoles comme toiture. Ces modes de construction, issus d'une histoire plurimillénaire, répondaient à des contraintes et des besoins économiques, sociaux, culturels et climatiques. C'est une architecture parfaitement adaptée à son contexte, où la maîtrise de la lumière, de l'eau et de l'air, illustrés par les *kanats* et les *badguirs*, les canaux souterrains et les tours à vent, permettait de faire face au rude climat dans des maisons fraîches aux cours ombrées par la végétation.

Aujourd'hui, il y a à Bam sept maçons capables de construire des coupoles en terre encore en activité officiellement, et tous sont employés par l'ICHTO, la direction du patrimoine iranienne. C'est un des nombreux exemples de disparition progressive des cultures constructives locales au profit des techniques de construction dites standard, phénomène constaté mondialement et qui semble parfois irréversible. Les techniques de construction non-industrielles ne disparaissent cependant pas complètement de la culture d'une société, mais elles deviennent uniquement patrimoniales. On ne construit plus avec, on documente, conserve et restaure. Il suffit de regarder le secteur de la construction en France pour voir un exemple abouti de ce phénomène.

Parmi les nombreuses raisons de cette disparition, on peut citer:

- Le rejet des techniques traditionnelles par les populations, surtout en milieu urbain,
- La difficulté de standardiser le matériau terre et donc de l'intégrer dans un secteur de construction normé,
- L'absence d'intérêt commercial qui entraîne l'absence de moyen pour la promotion de l'utilisation de la terre
- La disparition des structures sociales qui étaient liées à l'acte de construire, acte souvent communautaire,
- La disparition des schémas traditionnels de transmission des savoir-faire (maître-apprenti) au profit du système scolaire,
- L'absence d'enseignement des techniques traditionnelles dans le système d'éducation, professionnelle ou non, pour remplacer les schémas traditionnels.

En Iran, et plus spécialement à Bam, ce phénomène n'a pas encore complètement abouti. En effet, la relation des habitants avec la citadelle et les autres monuments historiques est très forte et les Bami ont un regard sur la construction en terre certes souvent passéiste mais positif. En outre, la terre était encore très présente avant le tremblement de terre et elle est toujours utilisée dans de nombreux villages proches de Bam, même si la qualité de mise en œuvre est souvent faible.

La ville de Bam s'est trouvée malgré elle à un tournant décisif pour sa culture constructive, la destruction quasi-complète et la reconstruction à venir accélérant le processus d'évolution.

On observe d'un côté les efforts d'une partie de la population et des élus de Bam, de la communauté scientifique nationale et internationale pour faire respecter l'histoire et l'identité de la ville. Ces efforts sont illustrés par la déclaration de Bam qui valorise 5 grandes directions :

- la conservation de la pleine signification culturelle d' Arg-é Bam et de son site.
- la conservation du caractère et du patrimoine de la ville et de son paysage urbain.
- l'intégration de la dimension patrimoniale dans le processus de récupération et de futur développement de Bam.
- la préservation et l'enrichissement de la tradition de l'architecture de terre.
- la protection et la prévention des risques exercés sur le patrimoine architectural en terre dans les régions sismiques.
- le recours à une large coopération à différents niveaux pour réaliser les objectifs de conservation.

D'un autre côté, comme nous l'avons vu, les normes iraniennes actuelles interdisent l'emploi de la terre à Bam. La quantité de logements à reconstruire intéresse bien sûr les entreprises de construction et de production de matériaux. Et par exemple, la première proposition du Master Plan d'urbanisme a suscité de vives inquiétudes. Elle restructure complètement l'ancienne trame de la ville sans considérations à l'égard des valeurs patrimoniales du site et de son environnement paysager, et rejette sans appel l'utilisation de la terre comme matériau de construction, conformément aux normes.

On risque donc d'assister à deux processus de reconstruction en parallèle, un pour la ville moderne, plus ou moins en dehors de toute considération des questions culturelles ou patrimoniales, et ce en dépit des recommandations de la déclaration de Bam, et un pour la buffer zone, la zone tampon entourant les sites historiques classés. Cette zone tampon doit en effet être soumise à des réglementations plus contraignantes sous la responsabilité de l'ICHTO (l'organisation nationale du patrimoine et du tourisme), sous peine de voir la nomination de Bam au Patrimoine Mondial annulée. Et la construction en terre y serait autorisée pour les mêmes raisons, même si ce point reste encore à définir plus clairement.

Cette différence de contraintes et moyens entre les deux parties de la ville pourrait entraîner une forme de ghetto culturel et historique. Le fait que l'organisation nationale du patrimoine et l'organisation nationale du tourisme aient fusionné en 2004 provoque certaines inquiétudes sur l'orientation trop touristique que pourraient prendre les actions de restauration. Dans le pire des scénarios, on aurait alors une ville nouvelle dénaturée sans aucun lien avec son passé et un centre historique donc l'activité serait exclusivement tournée vers le tourisme. La construction en terre ne serait plus utilisée que dans la zone tampon et passerait de l'état de culture encore vivante à celui de patrimoine.

A l'opposé, on peut espérer une nouvelle Bam en continuité avec son patrimoine, à savoir «un paysage culturel composé d'un environnement de désert, d'une exploitation ingénieuse de l'eau, de sa gestion et distribution par le système des kanats, d'exploitation agricole du territoire, de jardins et d'un environnement bati qui lui est propre»¹. Dans cette nouvelle Bam, la construction en terre aura naturellement sa place comme elle a pris naturellement place au cours de l'histoire. Cette nouvelle Bam servirait alors d'exemple en Iran mais aussi dans le monde, et permettrait de montrer à une échelle encore jamais vue que, en dépit de leurs performances, les techniques dites «modernes» ne sont pas les seules possibles aujourd'hui, et que les techniques traditionnelles peuvent être utilisées, améliorées ou non, mais en tout cas adaptées à une société qui a évolué.

I.3 Composante Socio-économique: reconstruire la société

I.3.1 Comment et pour qui reconstruire ? Enjeux socio-économiques

L'Iran a malheureusement une grande habitude des projets de reconstruction à vaste échelle, que ce soit suite à la guerre avec l'Irak ou à cause des nombreux tremblements de terre qui frappent le pays. Les autorités en charge des projets de reconstruction (l'Islamic Housing Foundation) sont par expérience tout à fait conscients des enjeux d'un vaste programme de reconstruction que l'on peut simplifier ainsi:

- Un projet dont les futurs habitants ne sont pas acteurs a peu de chances d'être accepté et de se voir approprié, avec les nombreux problèmes notamment sociaux qui en découlent,

- L'implication des habitants dans le processus de construction permet la création d'une économie locale nécessaire en situation post-catastrophe,

- L'utilisation de matériaux et techniques peu industrialisés privilégie l'utilisation de main d'œuvre par rapport à l'utilisation de machines et favorise ainsi la création d'emplois.

L'état des lieux fait ci-avant soulève la question des normes iraniennes de construction parasismique qui interdisent l'emploi de la terre comme matériau structurel dans les constructions. Le problème va cependant plus loin que le simple choix des matériaux. En effet, si l'on prend l'exemple de Bam, seules sont habilitées à construire les entreprises de niveau 5 dans l'échelle de compétence des entreprises iraniennes, ceci pour garantir la qualité des constructions. Cette échelle va de 1 à 8 suivant le nombre d'ingénieurs et architectes y travaillant et leurs qualifications.

Le processus de reconstruction décrit dans l'introduction, bien qu'impliquant les habitants dans une certaine mesure quant au choix des logements reconstruits, semble limiter l'impact économique et social au niveau local par l'implication d'entreprises sélectionnées au niveau national. L'utilisation par ces entreprises de main d'œuvre locale reste cependant un point à étudier pour pouvoir évaluer cet impact.

Cette offre de reconstruction officielle est insuffisante pour nombre de familles. Il leur faudra surement agrandir par la suite ou construire de nouveaux bâtiments alors que les entreprises de construction convoquées par l'IHF seront reparties. En outre, en étant réaliste, de nombreuses personnes ne seront pas incluses dans le programme de reconstruction officiel, notamment les personnes qui n'étaient pas propriétaires et les habitants dont la maison a été détruite dans les nombreux villages et hameaux autour de Bam. Il ne faut donc pas oublier ces constructions inévitables parallèlement ou après la première phase de reconstruction de l'IHF.

I.3.2 Un développement durable

Le terme de développement durable est largement galvaudé. A Bam il peut retrouver tout son sens. La reconstruction peut et doit créer des emplois et relancer une économie locale moribonde, tout en recréant le tissu social nécessaire à une vie urbaine la plus harmonieuse possible, et ceci dans des perspectives à très long terme (ou plutôt sans terme). Elle doit prendre en compte les spécificités de Bam, notamment climatiques, pour permettre une gestion des ressources et de l'énergie intelligente. L'échelle du processus de reconstruction et sa rapidité (plusieurs dizaines de milliers de logements en quelques années) font que le moindre facteur prend une importance qu'il serait néfaste de négliger. La construction en terre peut répondre de manière efficace aux problèmes posés par la reconstruction de Bam, et son adéquation au contexte local est la raison de son utilisation systématique jusqu'à il y a trois décennies.

La construction en terre est génératrice d'emplois, mais aussi créatrice de richesses locales. En effet, même si son coût peut être plus élevé que celui de construction standard, la très faible quantité de matériaux industrialisés (et donc souvent produits ailleurs), l'utilisation de main d'oeuvre plutôt que de machines, l'utilisation de matériaux locaux transformés sur place, font que le pourcentage du coût de construction réinjecté dans l'économie locale est bien plus élevé.

L'utilisation de techniques relativement simples et connues car dans la continuité des cultures constructives augmente les chances d'une appropriation par les habitants. L'utilisation d'une majorité de matériaux disponibles localement et sinon standards et faciles à se procurer font que l'appropriation des techniques peut être durable et survivre au départ des entreprises de construction mandatées par l'IHF. Elles peuvent aussi être utilisées par les populations n'ayant pas accès au secteur de construction privé et fonctionnant plutôt par autoconstruction, comme les personnes les plus pauvres ou habitant dans les villages autour de Bam.

L'utilisation de matériaux ne nécessitant pratiquement aucune énergie de transport et de transformation permet de réduire l'impact sur l'environnement. La construction en terre, correctement conçue, est adaptée au climat de Bam, qui peut être très chaud mais aussi très froid. Elle permet de réduire de manière significative la consommation énergétique des bâtiments, notamment l'utilisation de climatisations.

L'arrivée en voiture à Bam permet de se rendre compte de l'importance de la question du recyclage des matériaux de construction. Les routes rejoignant Bam sont maintenant bordées, sur des dizaines de kilomètres, par des tas de gravats provenant des décombres de plusieurs milliers de bâtiments. Les aciers et fers à béton sont récupérés pour être recyclés à la démolition. Des revendeurs fouillent les champs de gravats pour revendre les briques cuites (et autres) aux habitants les plus pauvres. Les milliers de tonnes de gravats restant risquent eux de rester très longtemps en place, dans ce qui est «heureusement» un désert inhabité.



I.3.3 La (re)création d'une filière de construction en terre

La création d'une filière de construction en terre à Bam ne se limite donc pas à la production de matériaux de construction, ce peut être le moyen de préserver une partie de la culture de Bam, de créer des emplois et des richesses locales, et de fournir au plus grand nombre possible un logement adapté aux besoins et au contexte locaux.

Cependant, la viabilité d'une filière de matériaux de construction repose sur quelques points essentiels et indissociables :

- Le matériau: sa production nécessite le choix et la disponibilité de matière première, éventuellement l'utilisation de machines

- La main d'œuvre: que ce soit celle pour produire le matériau ou le mettre en œuvre, sa qualification est nécessaire pour un niveau de qualité suffisant face au risque sismique.

- Les débouchés: ceux-ci sont assurés par l'acceptation de ce mode de construction par les habitants et les collectivités mais aussi par les concepteurs (architectes et ingénieurs).

- La compétitivité: ce point est le plus difficile à appréhender. Il dépend notamment de la notion d'échelle de la filière, qui peut aller de la rénovation de quelques monuments historiques à la reconstruction d'une partie de la ville.

On voit donc que c'est une entreprise sur le long terme pour laquelle seront nécessaires :

- Des actions de sensibilisation,
- Des formations à tous les niveaux,
- Des programmes de recherche,
- Des projets pilotes.

L'utilisation de processus itératifs est particulièrement adaptée à ce cadre, suivant des cycles dont les étapes sont les suivantes:

- Analyse du contexte,
- Conception,
- Mise en œuvre,
- Evaluation.

Avant d'envisager un projet de construction à Bam, dans le cadre de la problématique explicitée au premier chapitre, il est nécessaire de définir quelques pré-requis indispensables à l'adéquation du projet à son contexte.

Des principes de construction parasismiques généraux sont exposés, ainsi que les limites et possibilités d'applications de ceux-ci dans le cadre du projet.

Le projet s'inscrivant dans un cadre dont l'héritage culturel est particulièrement marquant, il est nécessaire de prendre connaissance des différents aspects de la culture constructive locale afin de pouvoir en tirer les éléments qui permettront d'en assurer la continuité.

Pour assurer le caractère parasismique du projet, on pourra se référer aux nombreuses cultures parasismiques de construction en terre de par le monde, ainsi qu'aux différents projets et programmes de recherche déjà réalisés. Pour cela, un aperçu de l'état de la science dans le domaine de la construction parasismique en terre est indispensable.

II.1 Principes de construction parasismique	20
II.1.1 Effets des séismes sur les constructions	20
II.1.2 Mécanismes de résistance des constructions aux séismes	22
II.1.3 Adaptation au contexte	27
II.1.3 Approche globale de la conception parasismique	29
II.2 Les cultures constructives de Bam	30
II.2.1 Principes constructifs	30
II.2.2 Principes architecturaux	55
II.2.3 Les cultures constructives face aux processus de dégradation	60
II.2.4 Les cultures constructives de Bam face aux séismes	64
II.2.5 Etat des lieux de la construction en terre aujourd'hui à Bam	68
II.2.6 Les constructions dites «standard»	73
II.3 La construction en terre parasismique à travers le monde	78
II.3.1 Solutions vernaculaires	79
II.3.2 Programmes de recherche	83
II.3.3 Solutions expérimentales	88
II.3.4 Solutions modernes éprouvées	92
II.4 Conclusions	95

II.1 Principes de construction parasismique

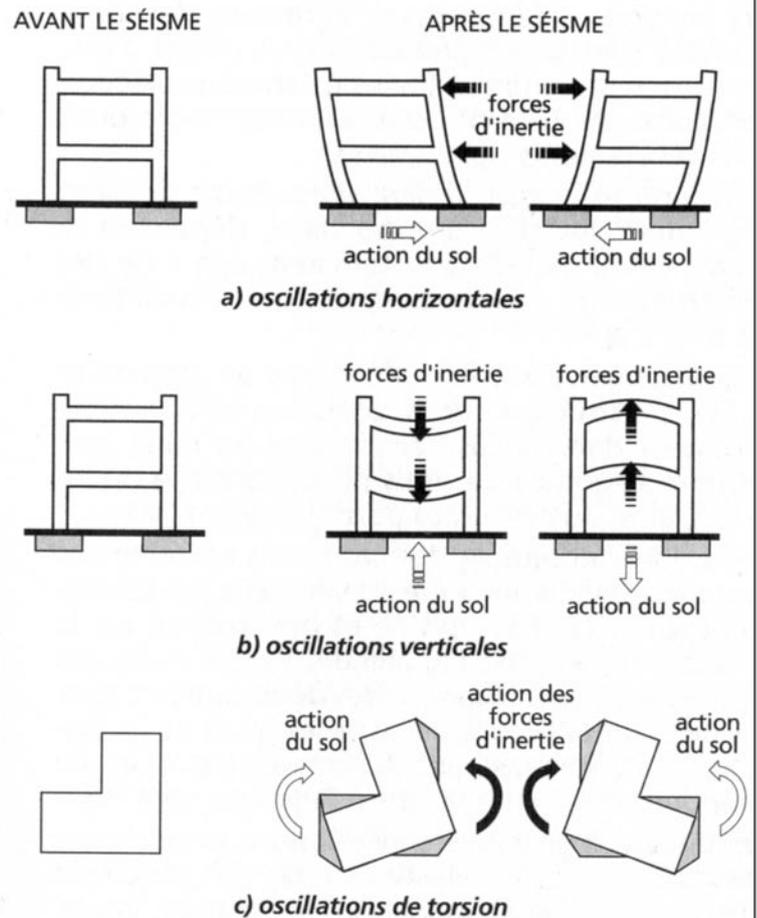
II.1.1 Effets des séismes sur les constructions

Les vibrations du sol (horizontales et verticales) provoquées par le passage des ondes sismiques entraînent les constructions dans leur mouvement. Celles-ci subissent donc des oscillations horizontales, verticales et de torsion. Les forces d'inertie, qui sont la manifestation de la tendance des constructions à rester immobiles, sollicitent directement la superstructure.

La rigidité latérale des constructions étant en général plus faible que leur rigidité verticale, les oscillations horizontales sont en général les plus dangereuses.

Les effets des oscillations verticales sont en général non négligeables dans les zones voisines de l'épicentre du séisme.

Les déplacements horizontaux du sol produisent également des oscillations de torsion des constructions, couplées avec leurs oscillations latérales.



Oscillations des constructions induites par les vibrations du sol.

La flexion et le cisaillement d'ensemble peuvent engendrer des efforts importants dépassant la résistance des matériaux, notamment à la base des constructions où ils atteignent leur maximum.

Le cisaillement peut ainsi provoquer un glissement du bâtiment sur ses fondations ou désolidariser la toiture des murs.

Les ruptures diagonales en X sont typiques dans les murs en maçonnerie et sont dues au cisaillement.

La flexion d'ensemble des bâtiments peut entraîner la rupture d'éléments porteurs verticaux.

Les balancements des constructions provoquent des déformations inélastiques des sols réduisant ainsi leur résistance, et pouvant entraîner une inclinaison rémanente des ouvrages.

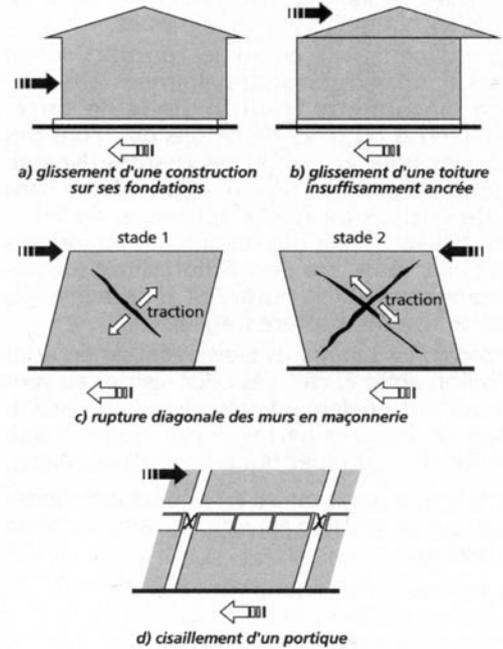
Les oscillations verticales sont en général très riches en hautes fréquences proches des fréquences d'oscillations libres des construction ce qui amplifie les efforts que ces dernières subissent.

Cependant, à moins d'une sollicitation importante en flexion composée (flexion + compression), la résistance des éléments porteurs verticaux n'est généralement pas compromise par l'action seule des oscillations verticales. Elles sont par contre plus dangereuses pour les éléments de franchissement, les tirants et les éléments en porte-à-faux.

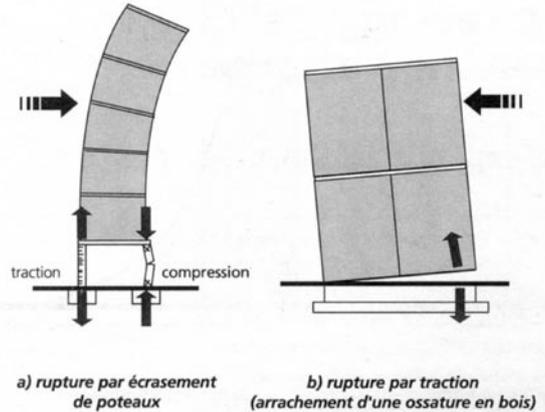
Si l'accélération verticale dépasse celle de la pesanteur, les toitures incorrectement ancrées peuvent être arrachées. On observe également des déplacements différentiels du sol.

Les effets des oscillations de torsion sont particulièrement importants pour les bâtiments de forme irrégulière ou possédant un contreventement excentré. En effet, comme le montrent les schémas ci-dessous, quand les éléments verticaux rigides assurant le contreventement ne sont pas symétriques par rapport au centre de gravité de la construction, la structure est soumise à un couple de torsion horizontal, dont les effets peuvent être considérables.

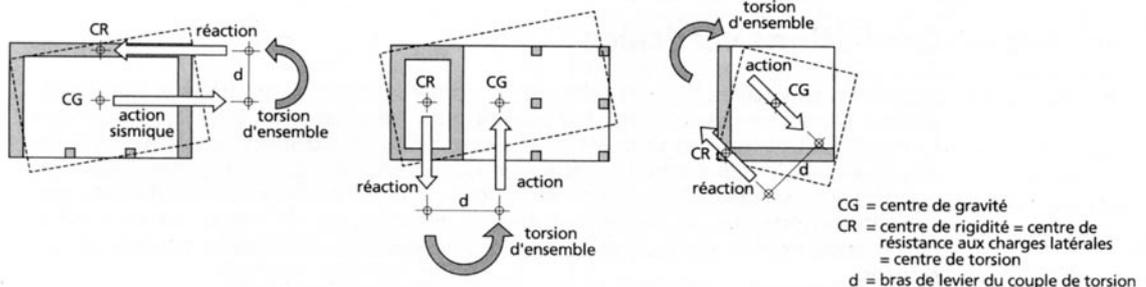
Cependant, même les bâtiments simples et symétriques subissent des oscillations de torsion dues à des déplacements différentiels du sol, à des défauts inévitables de l'exécution ou à une défaillance progressive des éléments porteurs en cours de séisme.



Domages structuraux dus au cisaillement.



Domages structuraux dus à la flexion.



Torsion d'ensemble.

II.1.2 Mécanismes de résistance des constructions aux séismes

Equilibre dynamique

Les secousses du sol provoquent des oscillations forcées des constructions qui y sont fondées. Lorsque le tremblement de terre s'arrête, les mouvements cycliques de bâtiments continuent sous forme d'oscillations libres de période propre T à peu près constante jusqu'à leur amortissement complet. La résistance des bâtiments aux déplacements de leur base donne naissance à des forces d'inertie dans le sens opposé au mouvement. Plus une construction est lourde, plus grandes sont les forces d'inertie qu'elle subit.

Ces forces d'inertie (F_i) déforment la structure et constituent donc des charges, les charges sismiques, auxquelles elle doit résister. Les forces dues à l'élasticité de la structure (ou forces de rappel F_r) tendent à ramener la structure à sa position non déformée. Une partie des forces (F_d) est dissipée par des phénomènes que nous détaillerons plus loin. Pour qu'il n'y ait pas rupture, on doit avoir l'équilibre dynamique suivant:

$$F_i = F_r + F_d$$

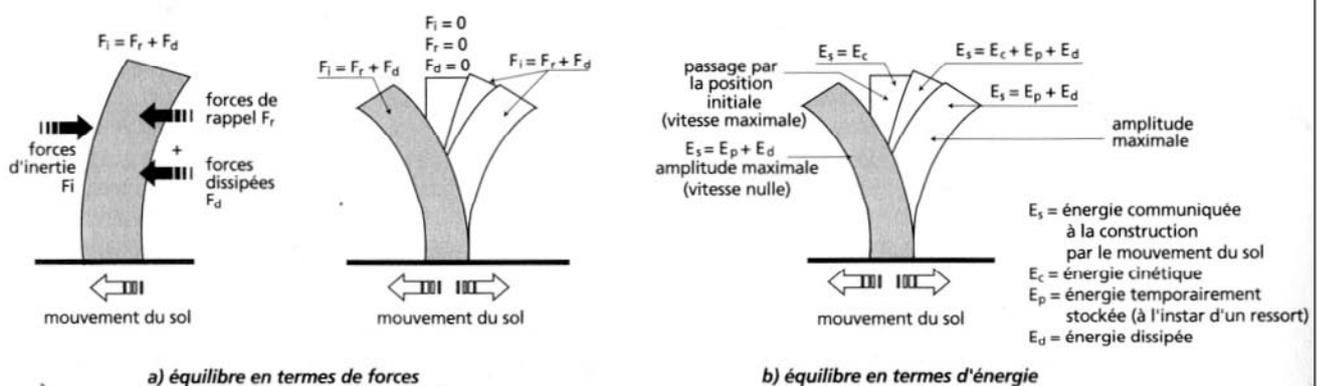
Cet équilibre dynamique peut aussi être exprimé en terme d'énergies. L'énergie E_s que le sol transmet aux constructions est en partie dissipée par amortissement E_d . L'énergie non dissipée est présente dans le bâtiment sous forme d'énergie cinétique E_c et d'énergie de déformation élastique E_p (énergie potentielle stockée). On a donc l'équilibre suivant:

$$E_s = E_d + E_c + E_p$$

Lorsque le bâtiment est au maximum de déformation, sa vitesse instantanée et donc son énergie cinétique E_c sont alors nulles. A ces moments, toute l'énergie non dissipée est transformée en énergie potentielle stockée dans la construction grâce à ses déformations élastiques:

$$E_s = E_d + E_p$$

Si l'énergie fournie à la structure est supérieure à sa capacité à la dissiper et à la stocker, on a alors rupture des éléments constructifs les plus sollicités. Leur défaillance entraîne un report d'effort sur les autres éléments qui peuvent céder à leur tour.



Première conclusion

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, c'est à dire accroître sa résistance mécanique et/ou accroître ses capacités à stocker et dissiper l'énergie.

Minimiser les charges sismiques

L'intensité des forces d'inertie qui agissent sur un corps infiniment rigide mis en mouvement accéléré est directement proportionnelle à sa masse et à son accélération : $F_i = m \cdot a$

Deuxième conclusion:

Les constructions légères sont plus avantageuses que les constructions lourdes.

Les matériaux ayant le meilleur rapport résistance / masse volumique sont donc à préférer. Les éléments non structuraux devraient être légers.

Pour les corps déformables dont les bâtiments font partie, la relation ci-dessus est vraie pour chaque masse dont le bâtiment est constitué (planchers de chaque niveau par exemple). En effet, deux éléments de même masse ne sont pas forcément soumis à la même accélération, dans la mesure où l'accélération transmise par le sol est plus ou moins amplifiée par l'élasticité de la construction et que cette amplification n'est pas uniforme. Dans le cas des constructions simples et régulières, elle est plus grande aux étages supérieurs.

Pour réduire les accélérations que les éléments de la construction subiront, on peut donc minimiser les accélérations du sol de fondation, en choisissant un site qui ne donne pas lieu à une amplification excessive des vibrations transmises par le substratum rocheux, ou minimiser les accélérations des différents éléments de la construction.

La réponse d'un type de bâtiment aux oscillations du sol varie en fonction de la nature du sol, suivant que sa période propre est proche ou éloignée de la période prédominante du sol. En cas de périodes très proches, le bâtiment peut entrer en résonance, avec une amplification extrême de ses oscillations.

Les constructions amplifient d'autant moins les accélérations que leur amortissement est élevé.

En découplant les constructions des vibrations du terrain, on peut réduire sensiblement l'amplification des accélérations.

Troisième conclusion

Les principaux moyens de minimiser les accélérations auxquelles les constructions pourraient être soumises sont les suivants :

- 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'assise (bâtiments rigides sur les sols meubles, bâtiments flexibles sur les sols fermes et rigides)
- Préférer les constructions de faible hauteur ou enterrées.
- Repartir les masses symétriquement par rapport au centre géométrique de chaque niveau.
- Placer les masses importantes de préférence aux étages inférieurs.
- Concevoir des constructions ayant un amortissement élevé.
- Concevoir des bâtiments de forme simple et symétrique dont la structure porteuse est régulière et contreventée symétriquement, pour éviter les phénomènes de torsion d'ensemble.
- Utiliser des appuis parasismiques pour allonger la période propre des constructions basses et rigides.

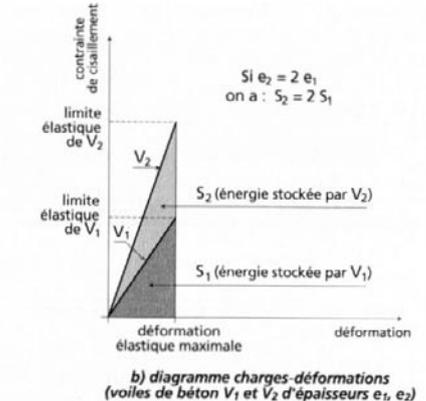
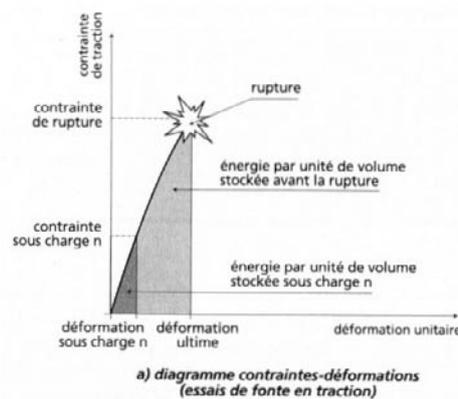
Capacité des constructions à stocker l'énergie

Les constructions stockent l'énergie grâce à leurs déformations élastiques, à la manière d'un ressort. Pour des charges modérées, tous les matériaux se déforment élastiquement, leurs déformations étant réversibles. Si l'on atteint la limite d'élasticité du matériau lorsque les charges augmentent, deux cas se présentent: rupture du matériau si il est fragile ou apparition de déformations plastiques (irréversibles) si il est ductile. Les notions de fragilité et de ductilité sont étendues aux éléments constructifs, à leurs assemblages et à la structure entière.

La quantité d'énergie emmagasinée dans les éléments constructifs peut être représentée sur les diagrammes contraintes-déformations ou charge-déformation. L'énergie par unité de volume stockée dans l'élément à chaque stade de déformation correspond à l'aire comprise entre la courbe et l'abscisse du diagramme.

Les matériaux et éléments flexibles peuvent donc stocker plus d'énergie que les matériaux et éléments rigides.

Pendant les secousses sismiques, les charges étant brutalement appliquées, la capacité des matériaux à stocker l'énergie est caractérisée par leur résilience (par exemple l'acier doux est plus résilient que l'acier rigide).



La flexibilité des éléments constructifs est obtenue par le choix des portées et un dimensionnement adéquats. Ainsi, un élément élancé est plus flexible et donc plus avantageux du point de vue du stockage de l'énergie. L'expérience montre que les poteaux courts résistent moins bien aux charges sismiques que les poteaux longs de même section, bien qu'il puissent supporter des charges statiques moins élevées. Il s'agit cependant de dimensionner les éléments de manière optimale pour les rendre flexibles sans mettre en danger l'intégrité des éléments non structuraux.

La capacité de stockage d'énergie d'une structure dépend de celle de ses éléments mais aussi de la nature et du nombre de liaisons qui les relient. Les structures hyperstatiques (qui ont un nombre d'éléments et de liaisons supérieur au minimum nécessaire à leur stabilité) sont ainsi beaucoup plus avantageuses que les structures isostatiques, même si elles sont plus sensibles aux mouvements différentiels des sols.

Quatrième conclusion

Pour accroître la capacité des constructions à stocker l'énergie on peut :

- Utiliser des matériaux résilients (acier, bois),
- Opter pour une structure flexible lorsqu'elle convient par ailleurs, et il est préférable d'éviter dans ce cas le surdimensionnement,
- Dans le cas d'une structure rigide, dimensionner largement les éléments porteurs.
- Conférer à la structure une ductilité élevée.
- Choisir un système porteur ayant un haut degré d'hyperstaticité.
- Assurer une distribution correcte des charges au sein de la structure:
 - conférer aux planchers une rigidité horizontale plus grande qu'aux palées de rigidité.
 - répartir uniformément les masses, résistances et rigidités des systèmes porteurs tant en plan qu'en hauteur.
 - conférer une rigidité comparable aux éléments ayant une même fonction structurale.
 - assurer une continuité mécanique entre les éléments de structure et aux changements de direction.
 - limiter les concentrations de contraintes en évitant les angles rentrants importants, les variations brutales de section, les percements importants.
 - dimensionner largement les éléments à paroi mince.

Capacité des constructions à dissiper l'énergie

Les mécanismes de dissipation d'énergie par les constructions pendant leurs oscillations sont divers. On peut les classer en quatre catégories:

Réflexion vers le milieu environnant

La quantité d'énergie réfléchi par les constructions vers le sol peut être importante. Elle augmente avec la profondeur des fondations, la déformabilité du sol et la masse de la structure.

Frottement externe

Le frottement qui se produit dans les joints aux interfaces de contact entre différents matériaux et dans les matériaux fissurés est plus ou moins importante selon le type de construction. L'énergie ainsi dissipée est indépendante de la fréquence des oscillations mais croît avec leurs amplitudes. Elle diminue après la destruction des éléments (en général non structuraux) qui ont participé à l'amortissement des mouvements de la construction.

Fissuration et rupture d'éléments constructifs

Ces phénomènes libèrent, par la rupture des liaisons interatomiques des sections concernées, l'énergie de déformation qui y était stockée. Il convient dans la mesure du possible d'éviter la destruction de toute partie de la structure indispensable à sa stabilité. Les structures hyperstatiques montrent ici leur intérêt. On peut par contre prévoir des éléments fusibles.

Amortissement interne

L'amortissement interne représente la cause la plus importante de dissipation d'énergie. Il est dû principalement à la viscosité et au comportement inélastique des matériaux.

L'énergie dissipée par amortissement visqueux augmente avec la fréquence d'oscillation de la construction. Tous les matériaux possèdent une certaine inélasticité, due à des mouvements réversibles de dislocations et à des défauts ponctuels de leur structure cristalline, même si celle-ci est de second ordre par rapport à l'élasticité. La dissipation d'énergie due à l'inélasticité est indépendante de la fréquence d'oscillations. Elle est connue sous le nom d'amortissement d'hystérésis. Sur les diagrammes contraintes-déformations, cela se traduit par la non superposition des courbes de chargement et de déchargement, qui décrivent des boucles appelées boucles d'hystérésis. L'aire de chaque boucle est proportionnelle à l'énergie dissipée pendant le cycle correspondant. Cette énergie augmente avec la déformation.

Pour les matériaux ductiles, lorsque la déformation dépasse la limite d'élasticité, les glissements des couches cristallines deviennent irréversibles, entraînant une restructuration de la matière. Dans ce domaine post-élastique, la quantité d'énergie dissipée devient notable. Dans une structure, les déformations plastiques absorbent une grande quantité d'énergie, réduisent la vitesse d'oscillations et entraînent un allongement de la période propre de la construction, ce qui est en général favorable. Cependant, les grandes déformations produites par les charges cycliques entraînent une dégradation progressive de la résistance et de la rigidité des matériaux. Cette dégradation peut être très rapide pour les matériaux fragiles comme les maçonneries.

La ductilité des matériaux est mesurée par le rapport entre la déformation ultime à la rupture d_u et la déformation élastique maximale d_e , appelé coefficient de ductilité. L'énergie dissipée grâce à la ductilité peut être considérable comme pour l'acier de construction dans le diagramme ci-contre.

La ductilité d'un élément de structure est en général plus faible que celle du matériau constitutif. Celle d'une structure dépend largement du système constructif et de l'organisation de ses composants. A part pour les ossatures bois, elle est proche de celle de son élément le moins ductile. La part de la ductilité dans la capacité d'une construction à dissiper l'énergie est pratiquement impossible à déterminer. On appelle le rapport d_u/d_e coefficient de comportement, ou q . Si il est très supérieur à 1 la construction est dite dissipative.

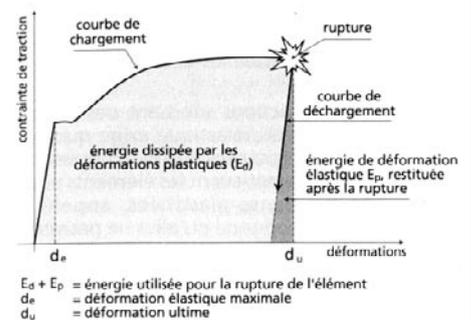
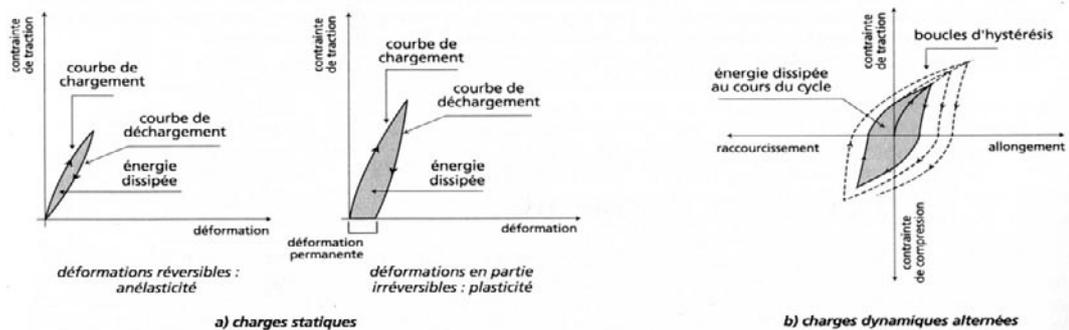


FIG. IV | 16 **Energie dissipée par la rupture d'un élément en acier (charge statique).**



Cinquième conclusion

Pour accroître la capacité des constructions à dissiper l'énergie on peut :

- suivre les démarches permettant de favoriser la capacité des constructions à stocker l'énergie, notamment en ce qui concerne la recherche d'une ductilité élevée.
- respecter le principe « poteau fort - poutre faible ».
- faire travailler les éléments de structure en flexion plutôt qu'en cisaillement ou torsion afin de préserver la possibilité d'un comportement ductile.
- prévoir des éléments fusibles destinés à se rompre au delà d'un seuil d'accélération.

II.1.3 Adaptation au contexte

Sans rentrer encore dans les détails du projet, on peut en définir les échelles, la complexité et le contexte pour étudier l'applicabilité des différentes conclusions du paragraphe précédent.

Bam est donc situé à proximité de la faille ayant provoqué le séisme, à une dizaine de km de l'épicentre. La composante verticale du tremblement de terre a été très importante, l'accélération ayant atteint 1G. Il est impossible de prédire de quelle nature sera le prochain séisme qui frappera Bam (et quand). Cependant, il vaut mieux respecter un principe de précaution et prévoir les constructions pour résister à de fortes accélérations verticales. La ville est construite sur des dépôts alluvionnaires meubles d'une épaisseur variant de quelques mètres à 50 m.

Ce projet concerne la réalisation de bâtiments essentiellement en maçonnerie de terre crue, ou adobes. Il est généralement déconseillé d'utiliser cette technique en zone sismique. Les raisons de ce choix ont été décrites au chapitre 1. Par contre, il faut garder à l'esprit la relative faiblesse de ce matériau et donc rester à des échelles de constructions limitant les risques. Pour ces raisons, il ne sera traité ici que de bâtiments à un seul niveau et de dimensions modestes.

Par ailleurs, la possibilité d'utiliser les solutions proposées pour des logements à faible coût est présente dans toutes les phases de la conception de ce projet. Les systèmes complexes de protection sismique (comme les appuis parasismiques et les amortisseurs) ne sont donc pas envisageables.

Minimiser l'action sismique:

En ce qui concerne la légèreté, la terre comme matériau de construction est clairement désavantagée, son rapport résistance / masse volumique étant bien inférieur à la plupart des autres matériaux. Par contre, connaissant cette faiblesse, il faudra chercher les solutions permettant de réduire le poids des structures le plus possible, notamment en allégeant le matériau tout en le renforçant. Au niveau de la structure aussi, il faudra pallier ces problèmes par l'utilisation de renforcements qui augmentent la résistance au cisaillement notamment.

Pour minimiser les accélérations subies par le bâtiment, la construction en adobe est ici avantagée. En effet, la période propre des constructions basses en maçonnerie est faible (entre 0,1 et 0,6 s) contrairement à celle des oscillations transmises principalement par les sols meubles comme celui de Bam. En outre, l'amortissement relativement élevé de ce type de structures (entre 6 et 15 %) limite les amplifications des accélérations du sol.

Le choix de construire des bâtiments de faible hauteur contribue aussi à limiter les effets des séismes. Il est nécessaire par contre lors de la conception de n'utiliser que des formes les plus simples et symétriques possibles, et dont la structure est régulière, en essayant de limiter le poids des couvertures.

Capacité des constructions à stocker l'énergie

On ne peut, pour la maçonnerie d'adobes, ni parler de matériau résilients, ni de structure flexible. On devra par contre dimensionner largement les éléments porteurs. Les systèmes de renforcement déjà évoqués, en plus d'augmenter la résistance des murs, leur apportent en général une certaine ductilité et permettent d'assurer une continuité mécanique entre les éléments porteurs. Dans le cas de toitures lourdes, comme des voûtes ou des coupôles, il est nécessaire de les asseoir sur un diaphragme qui aurait une rigidité plus grande que les murs porteurs.

Capacité des constructions à dissiper l'énergie

En plus d'augmenter la ductilité comme décrit ci-avant, on peut prendre en compte le frottement externe qui joue un rôle extrêmement important dans les maçonneries en adobe. Les maçonneries de remplissage de structures modernes en béton armé par exemple sont connues pour participer de manière non négligeable dans l'amélioration du comportement linéaire, même si cela n'est en général pas pris en compte dans les normes. Le programme de recherche du Getty Institute aux Etats Unis a montré quant aux structures en adobes non renforcées, que leur capacité de dissipation de l'énergie était très élevée grâce aux fissurations et ensuite aux frottements entre blocs de maçonnerie. Ce phénomène explique en partie le fait que de nombreux bâtiments en adobes non renforcés, à défaut d'être encore utilisables après un séisme, remplissaient très bien leur rôle de protection des personnes.

II.1.3 Approche globale de la conception parasismique

On peut pour conclure dire que le caractère parasismique d'une construction est directement lié aux quatres points suivants, dont aucun ne peut être négligé:

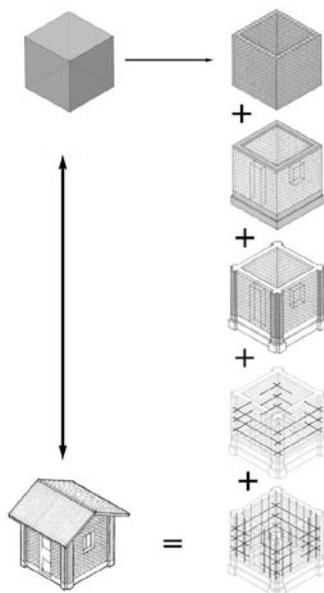
le sol



le matériau



la structure



le savoir-faire



II.2 Les cultures constructives de Bam

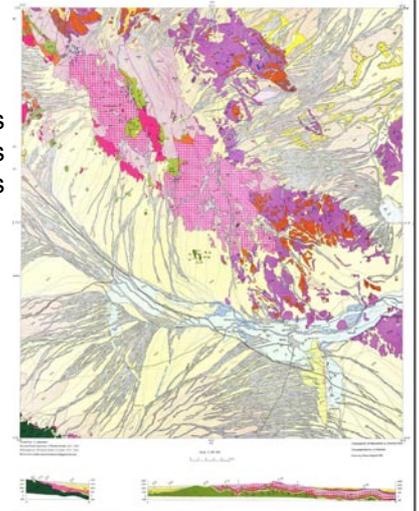
II.2.1 Principes constructifs

Matériaux de construction

Les matériaux utilisés traditionnellement pour la construction à Bam étaient principalement les matériaux disponibles localement. Leurs caractéristiques et usages seront présentés. Je ne décrirai cependant que les points spécifiques au contexte de Bam ou présentant un intérêt vis-à-vis du projet. Pour des informations plus complètes sur les techniques de construction en terre en général, on pourra se reporter aux ouvrages cités dans la bibliographie. Pour ce qui est de la mise en œuvre et de la production des matériaux, il est difficile de faire la part des choses entre ce qui pourrait être des pratiques traditionnelles et ce qu'elles sont devenues aujourd'hui. C'est pourquoi ce point sera abordé principalement dans la partie décrivant l'état des lieux de la construction en terre aujourd'hui à Bam.

La terre de Bam

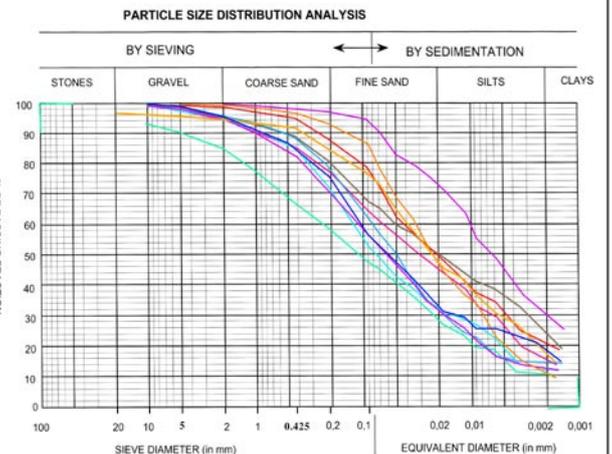
Les relevés géologiques de Bam et de ses environs nous indiquent que les sols à Bam consistent principalement en dépôts alluviaux formés de sables fins et silts du quaternaire. L'épaisseur de ces dépôts varie de quelques mètres à plus de 50 mètres (d'après IIEES).



Les terres cultivables sont concentrées sur les bords de la rivière et aujourd'hui recouvertes par les palmeraies et la ville. C'est sous ces terres cultivables que l'on trouve les terres propres à la construction. En effet, dès que l'on s'éloigne du lit de la rivière, le sol est alors trop pauvre en argile pour permettre la cohésion des terres.



Les terres utilisées pour la construction ont des compositions variables mais on peut dire que dans l'ensemble ce sont des terres très fines avec moins de 5% de graviers (>2 mm) et de 10 à 20 % d'argiles (<0,002 mm). La terre la plus fine utilisée pour des adobes relevée ne contient pas de graviers, seulement 3% d'éléments plus gros que 0,2 mm et 30 % d'argiles.



Le pourcentage d'eau résiduelle dans les murs est compris entre 2 et 3% et le retrait est en général entre 4 et 5% avec un minimum relevé à 2,9%.

Ce type de sol est particulièrement adapté à la production d'adobes. On peut remarquer sa grande résistance due à la forte cohésion des argiles, et sa bonne résistance à l'eau.



L'adobe.

L'adobe ou brique de terre crue est une technique de construction largement utilisée dans le monde entier et très courante en Iran. C'était la principale technique de construction utilisée à Bam avant l'avènement des techniques dites modernes. La terre à l'état plastique, après avoir reposé plusieurs jours, est moulée à la main dans des moules en bois avant d'être séchée à l'air libre (à l'ombre pour éviter un séchage trop rapide étant donné le climat de Bam). Les briques une fois séchées sont maçonnées à l'aide d'un mortier constitué en général de la même terre.

Le site d'Arg-é Bam couvre une période de construction de probablement plus de deux millénaires, avec des rénovations ayant débuté dans les années 70. Les terres utilisées et la taille des adobes employés ont évolué sur cette période.

Il est encore impossible aujourd'hui de définir précisément l'évolution des techniques de production. En effet, la composition des terres varie beaucoup dans les différentes constructions, mais aucune corrélation n'a pu être faite entre la période de construction et le type de terre utilisée.

Les adobes observées sur le site ont toutes une forme carrée. On peut toutefois noter le cas intéressant d'un bâtiment situé en dehors de l'Arg dans lequel les murs de forme circulaire sont constitués d'adobes trapézoïdales. On trouve aussi une voûte faite en adobes rectangulaires, mais la présence de papier imprimé sur le *lengeh* indique qu'elle est de construction récente. Le caractère exceptionnel des adobes rectangulaires, et leur éventuelle utilisation traditionnelle restent à confirmer.

On constate, comme c'est souvent le cas dans d'autres cultures, une réduction de la taille des adobes au cours de l'histoire. Les plus anciennes adobes découvertes sur le site font 40cm x 40cm x 12cm. Les adobes datées du 19^{ème} siècle ont en général une taille de l'ordre de 25cm x 25 cm x 10 cm. On peut faire les remarques générales suivantes quant à la taille des adobes:

- Plus elles sont grandes et plates, meilleur est leur comportement parasismique.
- Plus elles sont grandes plus les problèmes de retrait et fissuration sont difficiles à résoudre.
- Plus elles sont grandes plus leur mise en œuvre est difficile en raison de leur poids.



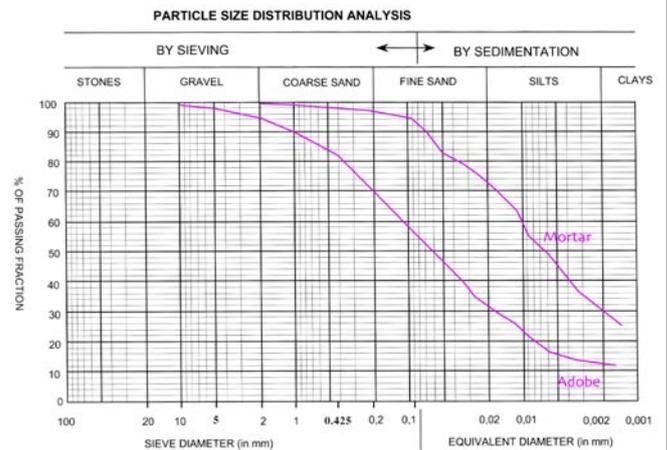
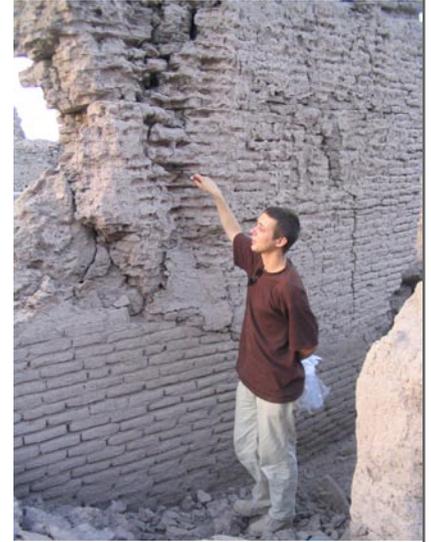
Dans la plupart des cas étudiés, la composition du mortier est la même que celle des adobes. On a pu remarquer trois exceptions pour lesquelles la terre utilisée pour les mortiers était différente.

Dans l'un des cas, la différence est facilement visible, le mortier contenant beaucoup de graviers alors que les adobes n'en contiennent pas.

Le second cas a été relevé par le comportement différent à l'érosion, le mortier ayant mieux résisté que l'adobe.

Le troisième cas a été montré par les courbes granulométriques.

Une couverture plus complète de l'Arg permettra de déterminer le caractère anecdotique ou non de cette pratique, et éventuellement la lier à une évolution des techniques de production.



Les observations et analyses effectuées sur le site ont montré l'utilisation de différents additifs mélangés à la terre.

Paille: Celle-ci a été systématiquement utilisée dans les adobes de l'Arg, à part pour les travaux de rénovation. Comme nous le verrons plus loin, l'utilisation de la paille est connue pour l'amélioration des caractéristiques qu'elle engendre:

- Réduction des phénomènes de retrait,
- Augmentation de la résistance,
- Diminution du poids.

A Bam, la paille utilisée au cours du siècle dernier était exclusivement de la paille de blé. Il est cependant certain que d'autres végétaux ont été utilisés auparavant, notamment du riz, ce que confirmeront des études plus poussées. L'analyse du type de paille et des quantités utilisées est rendue très difficile par le fait qu'une grande partie a été consommée par les termites. On peut cependant remarquer que les brins de pailles retrouvés faisaient entre 1 et 3 cm de long.

On a en outre trouvé un exemple de mortier très fortement paillé dont la période n'a pas été déterminée et qui s'est très bien comporté. Il pourrait s'agir cependant d'une utilisation anecdotique de *kah-gehl* comme mortier, étant donné que l'on n'en trouve pas d'autres exemples.

Roseaux: L'utilisation de roseaux est exceptionnelle dans l'Arg. On en trouve dans le mortier d'une fortification au nord de l'Arg ainsi que dans le mortier et certaines adobes d'un des remparts du château. La taille du roseau fragilise vraisemblablement les adobes, ce qui pourrait expliquer le caractère anecdotique de son utilisation dans celles-ci. Dans le mortier, les roseaux permettent d'en augmenter la résistance et d'éviter la propagation des fissures. Le manque de datation précise de ces constructions et la rareté de l'utilisation de cette technique rendent difficile la compréhension des raisons de son utilisation et de son abandon apparent. On peut noter que dans un mur voisin de celui du château contenant des roseaux, des petites branches ont été utilisées exactement de la même manière.



Tessons de poterie: La présence de tessons est très courante dans les adobes, mais aucune corrélation n'a pu encore être faite avec la localisation géographique ou historique des échantillons. La plupart des éléments de poterie trouvés ont une taille inférieure à 1 cm, mais certains éléments de 5 cm ou plus ont été relevés. Le rôle de cet additif reste à définir précisément, mais l'on sait qu'il permet de rajouter des éléments grossiers à la terre pour étendre sa granulométrie, tout en lui conférant parfois une certaine hydraulité par une réaction pouzzolanique en présence de chaux. C'était en outre un déchet très courant durant la majeure partie de l'histoire de Bam.



Cendres: La présence de morceaux de charbon de bois dans de nombreux échantillons pourrait indiquer l'utilisation de cendre de bois comme stabilisant. Son utilisation traditionnelle est connue dans d'autres régions d'Iran. En général, elle permet d'augmenter la résistance à la compression et de réduire le retrait, notamment grâce à la chaux qu'elle contient.

Os: Dans certains murs, on trouve des morceaux d'os dans les briques et le mortier, dont la taille varie de 5 mm à 5 cm. Le pourcentage en poids des éléments identifiés est de l'ordre de 1 %, mais il n'est pas encore défini si ces morceaux sont les restes d'un broyage d'os en poudre ou s'ils étaient utilisés tels quels. Leur rôle n'est pas encore identifié.



Le Kah-gel

Dans la plupart des constructions dans l'Arg et encore aujourd'hui, les murs et les toitures sont protégés des intempéries par un enduit de terre fortement paillée appelé *kah-gel*. Celui-ci est appliqué en une seule couche et la présence de paille ainsi que la bonne résistance de la terre à l'humidité lui assurent une grande longévité. La terre utilisée pour le *kah-gel* semble de manière générale être la même que celle utilisées pour les adobes. On peut noter que dans certaines régions d'Iran, on rajoute du sel au *kah-gel* pour augmenter sa résistance à l'eau.



Dans la partie nord de l'Arg (Konarhi), de nombreux enduits de toiture sont mélangés à des tessons de poterie de plusieurs cm pour en augmenter la résistance à l'érosion, mais cette pratique semble avoir été délaissée.



Le chiney (bauge)



Le *chiney* est le nom iranien pour la bauge ou terre empilée. La terre à l'état plastique est utilisée sous forme de boules qui sont empilées et façonnées pour former une assise de mur d'une hauteur de 60 cm environ. Chaque couche de mur est laissée à sécher avant d'y empiler la couche suivante. Les murs en chiney ont un fruit très important. Beaucoup sont faits de 7 couches (connus sous le nom de *haft chiney*) et atteignent quatre mètres de haut.

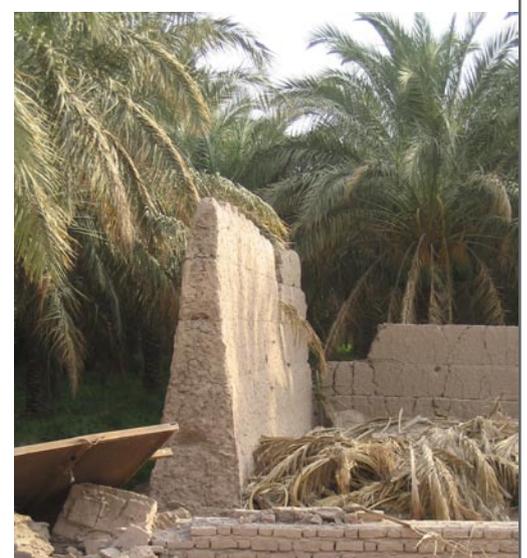
La terre utilisée pour le chiney est souvent plus grossière que celle des adobes, les graviers et cailloux n'étant pas retirés. Cela est rendu possible par le mode de fabrication et améliore la résistance aux intempéries des murs qui, en général, ne sont pas enduits.

On observe dans de nombreux murs en chiney une ou deux rangées d'adobes entre certaines couches de chiney. Cette technique semble améliorer un comportement intéressant de ce mode de construction. En effet, après séchage, le mur présente en général de très nombreuses fissures verticales. Celles-ci ne se propagent pas d'une couche à l'autre du mur, arrêtées par le joint horizontal entre chaque couche. Cela confère au mur un comportement proche d'une maçonnerie en gros blocs. La présence d'une rangée d'adobes entre les couches augmenterait cette séparation.

Le chiney semble n'avoir été utilisé à Bam, à quelques exceptions près, que pour réaliser des murs de clôture, que ce soient les très nombreux murs entourant les jardins ou certaines fortifications de l'Arg. On connaît certaines utilisations du chiney pour les habitations en Iran, mais l'image du matériau est en général mauvaise et on lui préfère l'adobe.

On est forcé de remarquer la résistance générale des murs en chiney face au séisme. La plupart des murs construits dans le sens principal des oscillations ont très bien résisté, mais ceux situés perpendiculairement ont très souvent mieux résisté que les constructions en adobe environnantes.

Il est dommage de constater que cette technique de construction qui a pourtant démontré ses nombreuses qualités ne suscite que très peu d'intérêts. La piètre image qu'elle a de matériaux juste bon pour les clôtures ne devrait pas empêcher d'effectuer des recherches sur ce sujet pour essayer de mieux comprendre son potentiel.



La pierre.

L'utilisation de la pierre n'est pas courante à Bam, cependant on rencontre de nombreux soubassements de murs réalisés en pierre maçonnés à la terre. Il semble que cette technique n'ait que très peu été utilisée pour les murs en adobe.

Les pierres utilisées sont en général des galets roulés. Leur forme arrondie peu propice à la maçonnerie et nécessitant beaucoup de mortier peut expliquer leur faible utilisation. Elles sont souvent maçonnées conjointement avec des briques cuites. Les soubassements permettent de protéger efficacement les murs contre les remontées capillaires et les éclaboussures en pied de mur.

Cette technique semble ne concerner dans l'Arg que les bâtiments les plus anciens, ce qui sera peut-être confirmé par des études plus approfondies. La bonne gestion des écoulements d'eau et de leur évacuation aurait pu rendre inutile l'utilisation de soubassements.

Les fondations du château sont réalisées en grosses pierres anguleuses, d'une taille supérieure à 50 cm. Le caractère unique de ce genre de construction est peut être dû à la rareté d'un tel matériau et à la difficulté de son extraction.

On trouve dans la partie nord de l'Arg (Khonary) des pierres utilisées pour réaliser des gouttières.

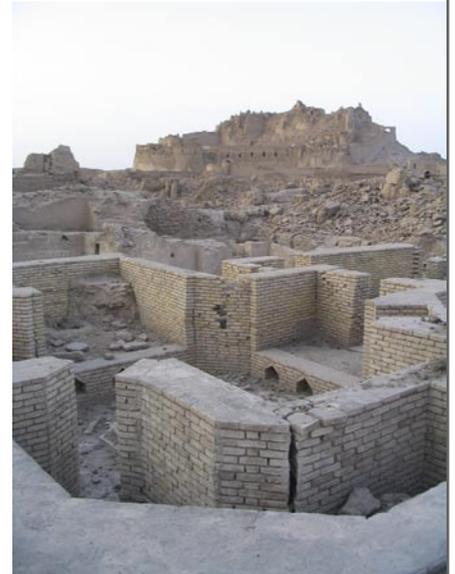
Les galets étaient aussi utilisés pour le pavage des allées, et c'est aujourd'hui leur principale utilisation lors des travaux de rénovation.



La brique cuite.

La brique cuite semble avoir été peu utilisée dans l'histoire de l'Arg, même pour des bâtiments de prestige. Elle a souvent été utilisée en Iran en parement pour les briques crues, comme c'est le cas de la fabrique de henné à Bam, mais ce cas semble isolé.

Elle était utilisée pour les sols, et les soubassements de murs. Son utilisation en couverture comme, c'est le cas dans beaucoup de constructions en Iran, ne semble pas exister, peut-être à cause de la faible pluviométrie qui n'en justifiait pas l'emploi.



Les bains étaient par contre construits en brique cuite, ainsi que les éléments soumis à une forte humidité, comme les puits, les citernes, les gouttières ou les canalisations.

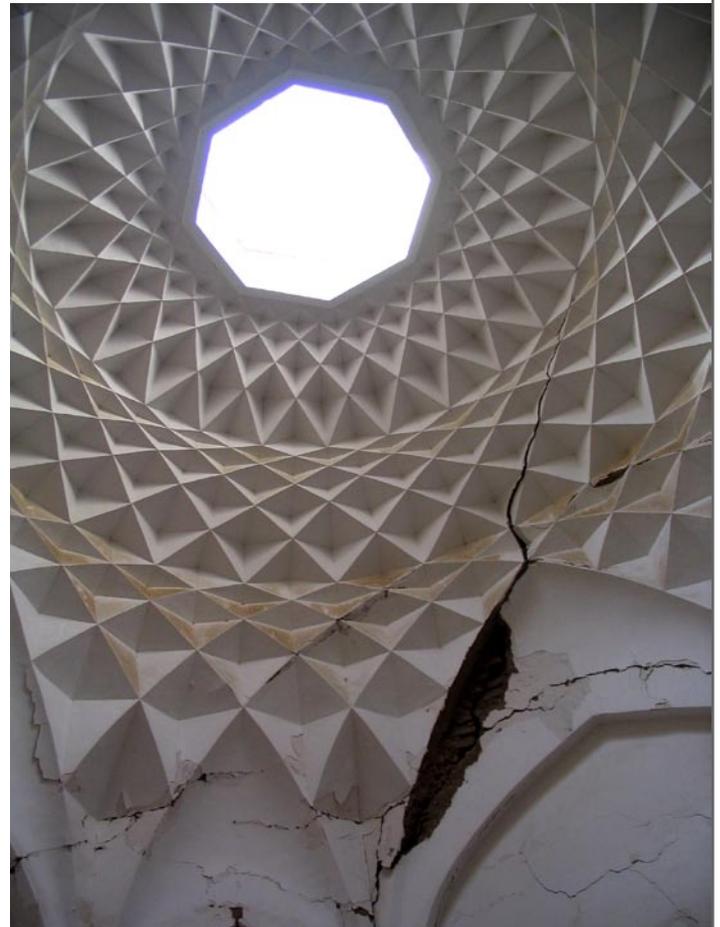
On trouve encore quelques fours à briques dans la citadelle et ses environs. Les briques faites probablement avec les terres les plus fines étaient cuites au feu de bois.



Le plâtre

Le plâtre est un matériau très utilisé à Bam, mais surtout en finition. De nombreux intérieurs sont enduits au plâtre avec une grande qualité de mise en oeuvre, le plâtre étant souvent mouluré à des fins décoratives.

L'utilisation du mélange terre-plâtre semble rare et ne servir que de mortier d'accroche pour les enduits de finition au plâtre. Les quelques exemples d'adobes maçonnées au plâtre que l'on trouve dans l'Arg et dans la ville sont récents. Cela permet en effet de monter les arcs plus rapidement, mais les maçons savent que la résistance de l'ensemble est moins bonne.



Une utilisation intéressante du plâtre que nous verrons plus en détail dans la partie concernant les structures est celle des *lengeh*. Ce sont des sortes de coffrages en plâtre armés de roseaux. Ils servent à monter les arcs et coupoles. Ils sont utilisés aussi comme règle pour dresser les enduits de kah-gel sur les murs. La présence de ces lignes blanches sur les façades participe à l'identité architecturale des bâtiments.



Le bois

On ne trouve des traces de l'utilisation de bois comme élément structurel que dans les bâtiments les plus anciens de Bam. Il s'agissait du bois des dattiers. Il semble avoir été utilisé pour former des linteaux mais aussi des chaînages en haut de murs. La disparition de cette technique pourrait s'expliquer par l'amélioration des techniques d'arcs, voûtes et coupôles et par la relative rareté du matériau dont l'utilisation principale est la production de dattes. On peut émettre aussi l'hypothèse que l'utilisation du bois soit un reste d'une culture parasismique qui est tombée dans l'oubli avec l'absence de tremblement de terre sur une très longue période.

Les poutres étaient constituées de demi troncs à peine dégrossis. La conservation de l'irrégularité des écorces pourrait s'expliquer par une amélioration de la liaison entre le bois et la terre.

L'utilisation du bois dans les périodes plus récentes s'est limitée à la fabrication des menuiseries.



La chaux

L'utilisation de la chaux, quoique connue, semblait limitée à la construction des éléments soumis à l'humidité constante, les bains (ci-contre), bassins, citernes (ci-dessous) et canalisations. La chaux est produite localement et disponible en grande quantité et à faible coût, quoique de qualité variable.



Structures

La majorité des structures étudiées ou nous intéressant sont réalisées en adobe. Nous nous concentrerons sur ce matériau dans ce paragraphe.

Murs

Les remparts de la citadelle sont constitués de nombreuses couches successives rajoutées au cours de l'histoire, avec parfois un mélange de chiney et d'adobe. Certains remparts sont creux et sont en fait constitués de voûtes qui ont probablement été utilisées comme salles ou stockage, comme l'indique la présence d'ouvertures.



Les murs en adobe des bâtiments de Bam sont en général très épais. L'épaisseur la plus courante est de deux briques et demi. L'utilisation de demi briques est bien sûr nécessaire. Ces demi briques semblent avoir été moulées et non cassées dans la plupart des cas observés. On trouve par contre de nombreux exemples de calepinages ayant nécessité des portions de briques de tailles variables (notamment pour des encorbellements).



Dans les bâtiments, l'utilisation de niches (*tagh-tché*) dans les murs permet de les alléger tout en créant des effets intéressants d'alternance avec les ouvertures. Ces niches font souvent une brique de profondeur. Elles sont dans la plupart des cas réalisées en encorbellement, mais l'on en trouve quelques exemples en arc. Le mur est en général plein jusqu'à 1m40 de haut et allégé au-dessus. Dans le cas d'une couverture utilisant des arcs, les niches correspondent aux espacements entre les arcs.



L'utilisation de contreforts est assez rare dans les constructions de Bam, et semble limitée aux constructions les plus anciennes. En effet, si l'on écarte les contreforts rajoutés durant les rénovations, on en trouve des traces dans les couches les plus anciennes de la tour 7 et sur certains bâtiments en dehors de l'Arg.



Le cas des murs supportant les coupôles sur pendentif et certaines voûtes est intéressant. On voit en effet la plupart du temps les briques montées en *lapush* sur des rangs en arcs de cercle. Ce type de pignon semble avoir particulièrement bien résisté au séisme. L'explication pourrait en être l'absence de direction principale des joints de mortiers empêchant la propagation des fissures dans une direction donnée. L'influence du caractère autostable de chaque arc sur la résistance de l'ensemble pourrait être étudiée. Son exécution nécessite cependant un certain savoir-faire pour obtenir des arcs de cercle réguliers, et l'on trouve d'ailleurs quelques exemples de ces structures présentant des irrégularités de forme prononcées.



Arcs

A quelques exceptions près, tous les arcs de Bam sont des arcs surbaissés. Ils sont maçonnés de trois manières différentes :

-*Zarbi* : C'est la manière la plus courante de construire des arcs. Les briques sont disposées radialement par rapport au centre (ci-dessous à gauche).

-*Lapush* : Dans ce cas, les briques sont placées le long de l'arc (ci-dessous à droite), soit à plat, soit sur la tranche. Dans le château, on trouve en outre un arc *lapush* qui sert de coffrage perdu à un arc *zarbi*, mais cette pratique semble anecdotique.



On trouve cependant quelques arcs à encorbellement. Celui-ci se trouve dans un caravansérail à l'extérieur de Bam. On trouve aussi des arcs en mitre pour des petites ouvertures, notamment dans les remparts de la citadelle.

Le montage des arcs est très différent qu'il s'agisse de *lapush* ou de *zarbi*. L'intérêt des arcs en *lapush* est que pour les petites portées aucun coffrage n'est nécessaire. Plusieurs maçons peuvent mettre en place les briques de la première assise qui sont beaucoup moins nombreuses que si elles étaient montées sur la tranche (dans l'exemple ci-dessus, cinq briques suffisent). Les assises suivantes pouvant alors être maçonnées en s'appuyant dessus.

Par contre, les arcs classiques ne peuvent être montés sans coffrage. Deux méthodes étaient utilisées pour réaliser les coffrages, qui n'utilisaient apparemment pas de bois, vu la rareté de celui-ci.

Coffrage en briques: celui-ci était monté sans mortier, à part pour l'arrondi final. Il est retiré une fois l'arc fini.

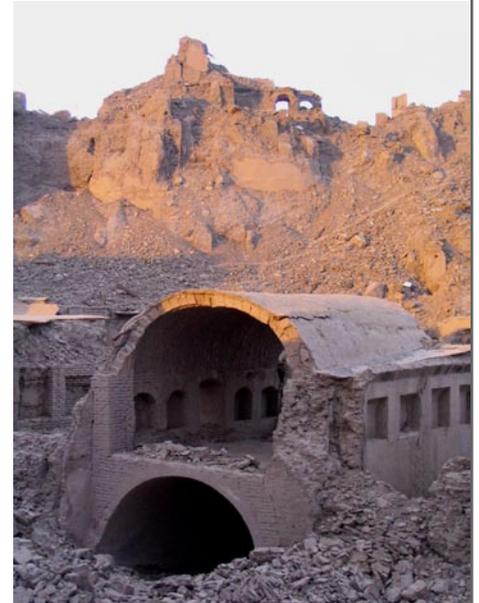
Lengeh: Il s'agit de coffrages en plâtre armé de cordes et de roseaux. Celui-ci est réalisé au sol, deux rangées de briques dessinant la forme de l'arc sur des papiers. Les armatures sont placées entre les deux rangées puis le plâtre coulé. Une paire de ces arcs permet de positionner correctement la première assise de briques. Ces arcs en plâtre sont souvent laissés sur place et forment en général des moulures une fois la construction terminée.



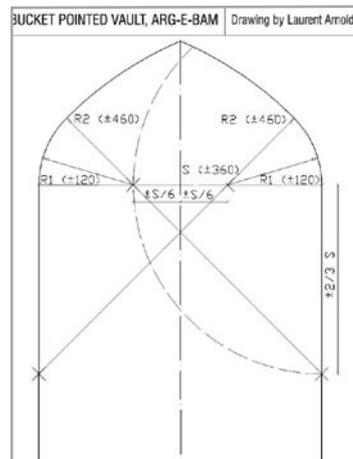
Voûtes

On trouve quatre types de section de voûtes à Bam

Arc surbaissé: c'est le type le plus courant, et il est systématiquement utilisé dans les constructions modestes. La position du centre du cercle de la voûte varie énormément d'une construction à l'autre.



Ogivale: Ce type de voûte est beaucoup plus rare. Toutes celles que l'on trouve à Bam ont été reconstruites lors de rénovations. Si l'on s'en réfère à l'observation ou à la littérature, il semble que cette forme n'aie jamais été utilisée que pour des arcs supportant des coupôles ou du moins faisant moins de 2 m de profondeur (à part le pont Pol-é Khadju d'Isfahan). On peut se poser la question de leur utilisation auparavant et si elles ne résulteraient pas de la volonté de reprendre la forme la plus courante des arcs en façade, le *pendjo-haft* (5-7) pour donner un certain caractère aux façades sans avoir à réaliser des voûtes plus complexes.



Anse de panier: ces voûtes en général très surbaissées sont utilisées souvent pour des faibles portées, comme les couloirs. Elles sont le plus souvent utilisées avec des moulures en plâtre rendant pratiquement plane leur partie supérieure.



Caténaire : Ce tracé de voûte sur la forme de chaînette inversée (à moins que ce ne soient des paraboles) a été utilisé à Bam, comme le montrent les quelques exemples ci-dessous, notamment dans les remparts (photo de droite). Cette forme semble relativement rare, et l'on manque d'éléments pour établir les raisons de son utilisation limitée.



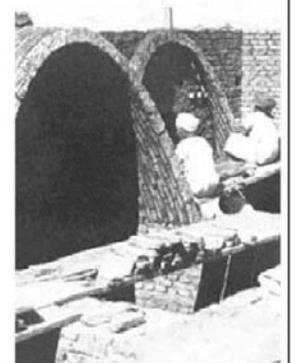
Construction des voûtes :

La plupart des voûtes de Bam sont construites suivant la méthode dit «nubienne», qui offre le grand avantage de ne pas nécessiter de coffrage. Les photos de Hassan Fathy ci-dessous en illustrent la méthode.



L'inclinaison des arcs successifs permet aux briques de coller grâce au mortier. Le choix et la préparation de celui-ci sont donc primordiaux pour avoir un fort pouvoir adhésif sans trop de retrait.

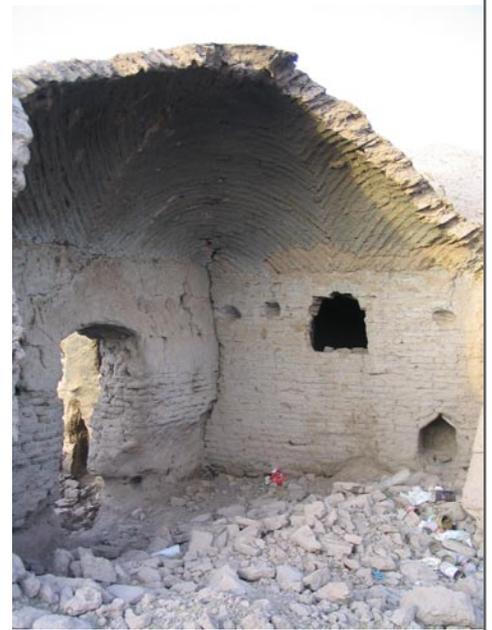
On voit beaucoup de voûtes construites lors des rénovations maçonnées au plâtre. Sa prise rapide permet d'accélérer et de faciliter le montage, mais au détriment de la résistance de l'ensemble.



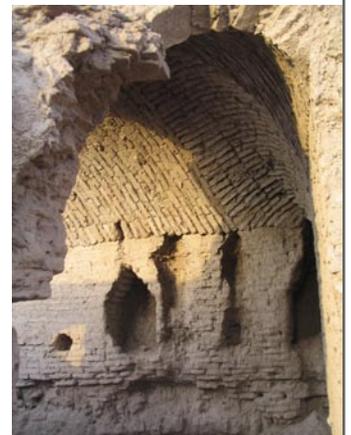
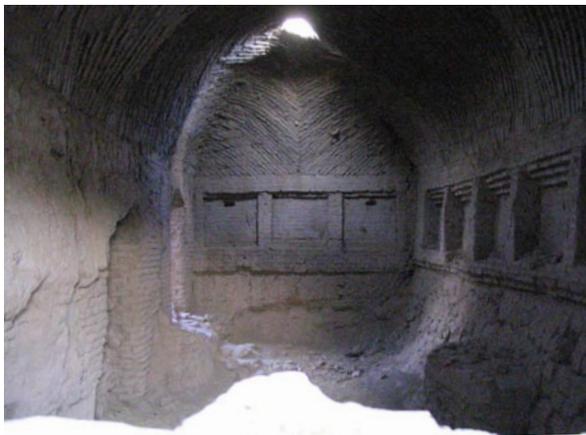
Voûtes en trompe d'angle

Celles-ci sont assises sur un plan carré ou rectangulaire.

Pour les voûtes sur plan carré ou rectangulaire proche du carré, ce qui représente la plus grande partie des cas, les quatre trompes se rejoignent suivant les médianes des murs.



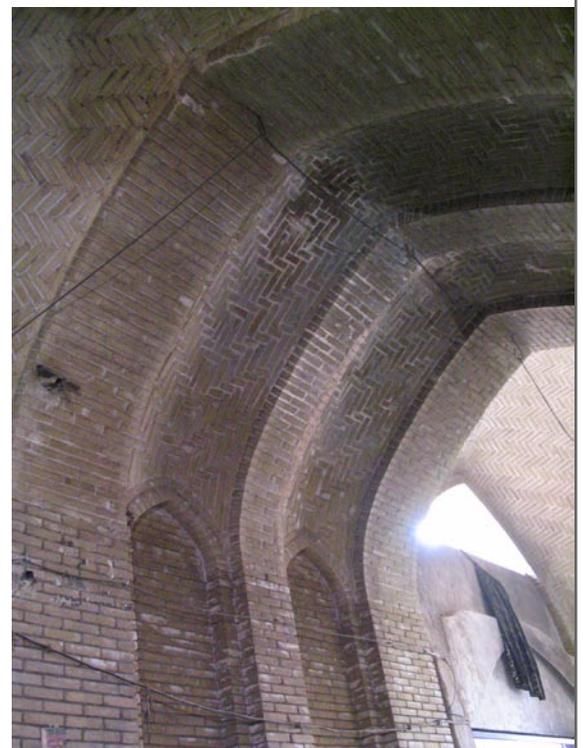
Dans le cas de rectangle dont les deux dimensions sont très différentes, deux trompes servent d'appui à une voûte «nubienne» sur laquelle vont ensuite s'appuyer les deux trompes de l'autre extrémité. Les deux photos ci-dessous en haut à droite sont l'extrémité de la voûte au dernier plan sur la photo du bas, qui fait une quinzaine de mètres de long.



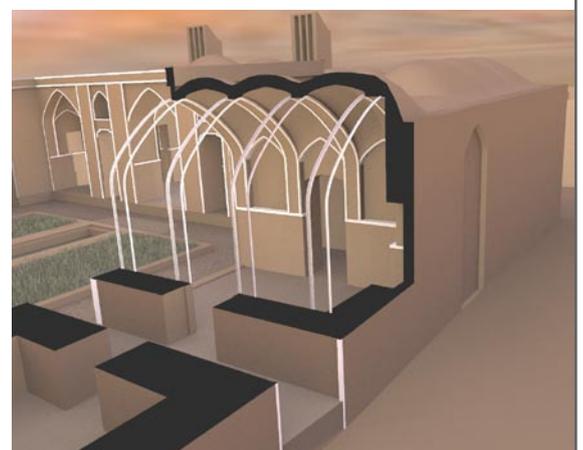
On trouve aussi de nombreuses voûtes qui sont en fait constituées de trois voûtes gauches très étroites accolées. Pour monter celles-ci, on construit deux arcs à l'aide de *lengeh* suivant la méthode décrite auparavant. Les murs pignons sont en général montés en arc de cercle, avec soit un *lengeh*, soit un encorbellement sur les dernières assises comme sur la photo ci-contre. Dans le cas de pièces donnant sur une cour, il n'y a en général qu'un mur pignon, l'autre extrémité étant formée d'un troisième arc. L'écartement entre les arcs est de l'ordre de 1 m. Des *lengeh* placés aux extrémités des arcs donnent la section de la voûte étroite qui est montée entre chaque arc. Celle-ci n'étant pas très large, 5 à 6 briques en *lapush* suffisent en section et elle peut être montée sans coffrage.



Un bel exemple de cette technique, avec un appareillage beaucoup plus riche, se trouve dans le bazar de Kerman. En effet, on ne trouve plus aucune de ces structures debout à Bam, leur résistance au séisme semblant très faible.

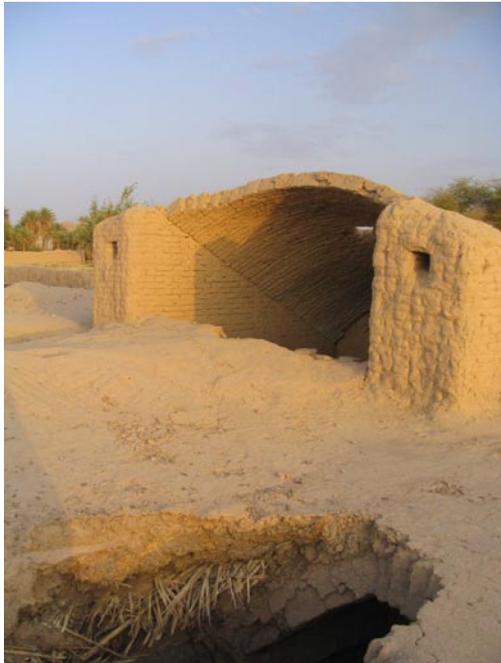


Cette reconstitution de la maison Sistani montre une coupe d'un *iwān* construit selon cette technique. Dans cette construction, six pièces étaient ainsi couvertes.



Autres voûtes

Cependant, on rencontre de nombreuses variations dans l'Arg et à l'extérieur de celle-ci comme le montrent les exemples ci-dessous, qui bien que parfois anecdotiques, démontrent du savoir faire des constructeurs Bami.



On a ici une forme intermédiaire entre la coupole et la voûte sur trompe d'angle, dans le temple zoroastrien au nord de l'Arg.

Dans le bongha de Nartij, un village proche de Bam, cette voûte en berceau rampant servait à capter le vent du nord pour rafraîchir la maison



Ce four à briques en adobe a la particularité d'avoir une ouverture dans sa voûte. D'un côté, la forme s'apparente à une voûte en navette, comme on en rencontre parfois dans l'Arg, mais appuyée sur un mur pignon avec des assises en arc de cercle typique. De l'autre côté, on voit des trompes d'angles sur lesquelles s'appuient différentes assises d'orientations variables pour encadrer l'ouverture.



Remplissage léger des voûtes

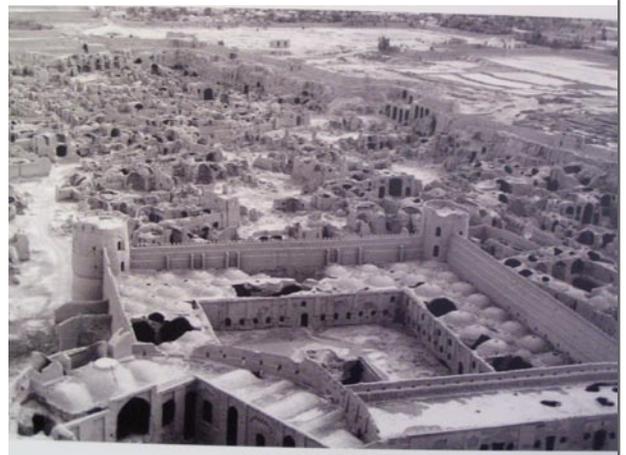
Le passage de la forme des voûtes au plan pour permettre la réalisation de toitures terrasse ou faciliter les problèmes d'évacuation des eaux de pluie était parfois fait en utilisant des petites voûtes plutôt qu'un remplissage plein.

Ceci permet de limiter la quantité de matériaux mis en oeuvre et d'alléger considérablement la toiture.



Coupoles sur pendentifs

Les écuries étaient un des plus beaux exemples de la maîtrise de cette technique, ci-contre avant les travaux de restauration.



Elles sont en général appuyées sur deux arcs et deux murs maçonnés en arc de cercle (photo ci-contre, un des arcs ayant été rempli a posteriori). Sur la photo ci-dessous on voit le départ du pendentif au coin des deux murs.

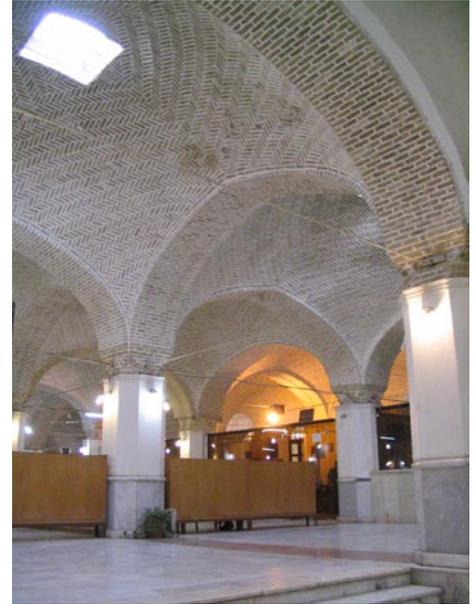


Leur section est en général en *pendjo-haft*, mais parfois aussi en arc de cercle comme dans la mosquée.



L'appareillage est très variable, même si l'on trouve à Bam peu d'exemples aussi impressionnants que les coupoles de la bibliothèque de Kerman ci-contre. On a principalement deux modes de construction

L'appareillage le plus courant utilise des briques disposées radialement, sur la tranche, suivant une technique plus proche de celle des voûtes que de celle des coupoles (on pourrait considérer ces structures comme des intersections de voûtes).



On trouve aussi des coupoles dont les briques sont posées parallèlement à la génératrice, notamment dans la mosquée.

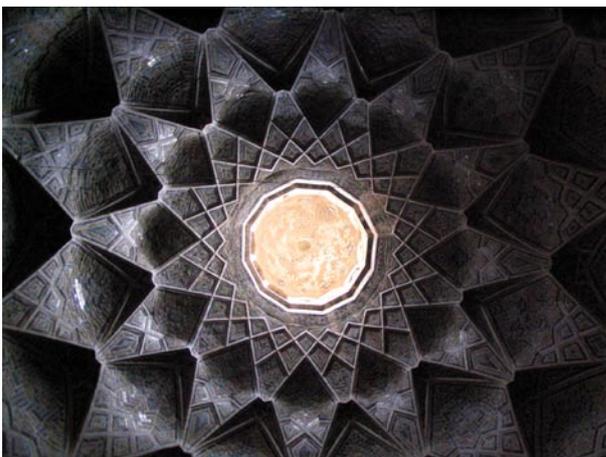


Les coupoles sur trompe et les *mogharnas*

Leur utilisation est très rare à Bam, apparemment en partie à cause de la relative pauvreté de la ville. On voit ci dessous le grand iwan de la mosquée et une coupole de la maison Ameri, toutes les deux situées en ville.



La ville voisine de Kerman montre beaucoup plus d'exemples des résultats magnifiques qu'a pu donner ce défi pour les constructeurs de passer du carré au cercle.



Coupoles sur plan circulaire:

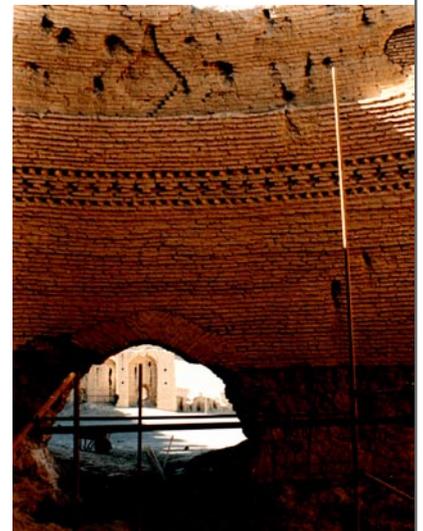
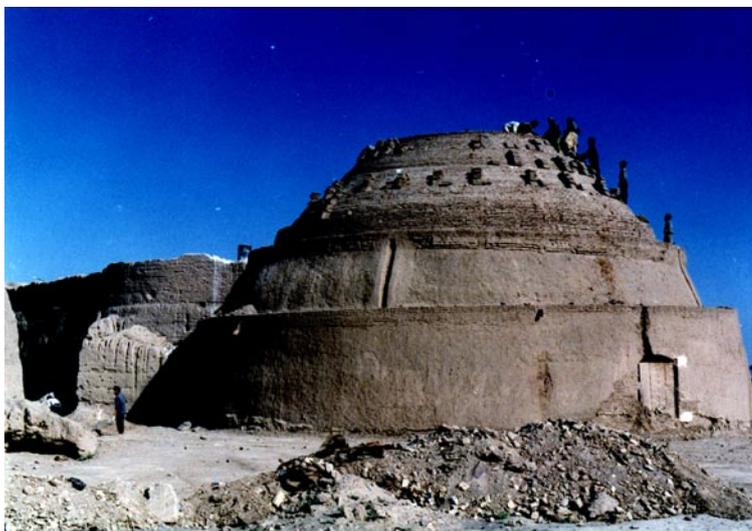
On trouve quelques cas à Bam de coupoles sur plan circulaire dont bien sûr la glacière. L'épaisseur de la coupole est beaucoup plus importante à sa base, avec un mur dépassant largement de celle-ci pour reprendre la descente de charge, voire des contreforts placés radialement. Etant donné l'impossibilité de pénétrer dans ces bâtiments, on ne peut que supposer qu'il s'agisse de coupoles à encorbellement, technique apparemment la plus répandue. Cette technique ne semble pas avoir été utilisée pour les habitations (ce sont ici deux moulins).



Ce type de coupole est rare dans l'Arg. On peut citer le temple zoroastrien au nord de l'Arg qui en comporte de taille très modeste avec un diamètre d'à peine 2 m.



La glacière en est bien sûr l'exemple le plus impressionnant avec un magnifique travail de calepinage des briques.



II.2.2 Principes architecturaux

Étant donné la vaste période que couvre l'histoire de Bam, dresser un inventaire des différents types architecturaux de la ville au cours de son histoire serait une entreprise hors d'échelle pour ce diplôme. En outre, étant donné le manque général d'informations sur l'histoire réelle de la ville, et les incertitudes sur la datation de nombreux bâtiments, ce travail demanderait des recherches, analyses et comparaisons que je n'ai pas la prétention d'entreprendre.

Cette partie a pour objectif de dégager certains points, en plus des éléments déjà décrits, de ce que l'on pourrait appeler l'identité architecturale de Bam. Elle est volontairement tournée vers l'habitat plutôt que l'architecture monumentale ou sacrée.

Une unité de conception de la mosquée à la maison rurale

Le point le plus marquant de l'architecture des villes iraniennes en général (et de la plupart des villes de l'Islam), et de Bam en particulier est que l'on retrouve les mêmes principes de conception des espaces, que ce soit pour les habitats modestes, les écoles coraniques les caravansérails, les palais ou les mosquées. La forme y est détachée de la fonction. Bien sûr, cela ne s'applique pas à certains bâtiments utilitaires aux formes bien définies tels que bains publics ou fortifications. Certains des éléments décrits ci-après sont évidemment typiques des habitations, mais l'ensemble reste vrai quel que soit l'usage de la construction.

Une architecture fermée sur l'extérieur, ouverte sur l'intérieur

Les bâtiments ont presque toujours des façades aveugles. L'espace privé se cache derrière ses murs ou les murailles du jardin pour les habitations plus modestes, pour se protéger du regard extérieur, mais aussi de la rudesse du climat et des paysages.

La porte est le seul lien entre ces deux mondes, elle revêt donc souvent un caractère exceptionnel. Elle permet en général aux visiteurs d'attendre à l'abri, avant de rentrer réellement dans l'édifice. L'entrée est elle-même un espace de transition, ne permettant pas de voir quoique ce soit de l'intérieur. Elle a souvent une forme octogonale, le *hachté*.

L'intérieur de la maison est lui-même divisé en espaces plus ou moins privés. Dans les constructions les plus modestes, il n'y a qu'une chambre pour les hôtes, mais celle-ci est placée de telle sorte que propriétaires et invités n'interfèrent pas. Dans les plus riches demeures, on a deux cours différentes pour les hôtes et les invités, autour desquelles s'organisent leurs espaces respectifs, l'*andaruni* (intérieur) et le *biruni* (extérieur). La partie réservée aux invités est en générale beaucoup plus belle que celle réservée à la famille. Tous deux sont accessibles directement depuis l'entrée. Une salle de réception, le *talar*, fait en général la jonction entre *andaruni* et *biruni*.

Le jardin

Celui-ci est la métaphore du paradis, le jardin idéal. Il est aussi le lieu d'apaisement en opposition à l'extérieur aride et hostile. Comme évocation de la perfection du paradis, il est géométrique. Le nom du jardin persan, le *pairidaeza* est d'ailleurs à l'origine du mot paradis.

La maison est autant ouverte sur le jardin que fermé sur l'extérieur. Celui-ci apporte en effet la lumière et la fraîcheur, ainsi que les parfums de ses fleurs et arbres fruitiers. Les grandes ouvertures en arc donnant sur la cour sont en général remplies de menuiseries en bois à petit carreaux, les *orossi*, qui permettent de filtrer la lumière mais aussi de préserver l'intimité des pièces. Les *orossi* des pièces principales n'ont pas de porte, l'accès se faisant par des pièces de distribution sur le côté. Les plus exposées au soleil étaient parfois protégées par un système de rideaux à l'extérieur que l'on pouvait dérouler.

Le jardin est aussi le lieu des rencontres, et c'est un des seuls espaces partagé par les femmes et les hommes.

L'iwan

L'iwan est un espace semi ouvert voûté donnant sur le jardin. Il offre un endroit lumineux mais ombré et à l'abri de la pluie, endroit idéal pour converser. Il semble trouver son origine chez les Parthes, et le premier exemple connu de cour entourée de quatre iwans est le palais d'Ashur (premier siècle de notre ère). Les plus grandes constructions se doivent d'avoir quatre iwans, mais les habitations n'en ont souvent qu'un ou deux.

La maîtrise de l'eau

L'exemple le plus marquant de la maîtrise de l'eau par les iraniens est bien sûr le système des *qanats*, les galeries souterraines qui amenaient l'eau depuis les nappes phréatiques coincées par la faille sur des dizaines de km. Cette eau est un élément essentiel du jardin. Elle y permet à la riche végétation de s'épanouir mais apporte aussi la fraîcheur et permet de faire les ablutions avant la prière. Les cours ont ainsi toutes un bassin, voire une fontaine et des canaux.

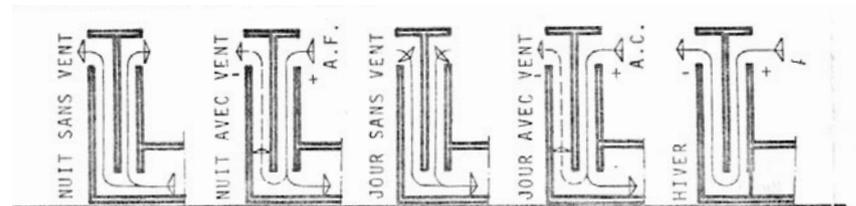
La maîtrise de l'air

Pour rafraîchir l'air pendant les étés brûlants, les iraniens avaient développé la technique des tours à vent, les *badguîrs* dont on voit ci-contre le plus élevé de Kerman.

Le principe en est très simple, mais très efficace. En cas de vent, la tour permet d'aérer, de jour comme de nuit. En l'absence de vent la chaleur accumulée la journée dans les parois fait monter l'air pendant la nuit, continuant ainsi à ventiler et à l'inverse, en début de journée, la fraîcheur accumulée pendant la nuit fait redescendre l'air.

Ce système extrêmement ingénieux et sophistiqué permettait de capter l'air en hauteur, où il est plus frais et moins poussiéreux, pour ensuite le redistribuer dans les pièces de la maison. Il passait pour cela, suivant la complexité du système, dans des conduits, des canaux ou des citernes souterrains pour être rafraîchi. Certains canalisaient même le flux d'air sur une fontaine pour qu'il emmène les gouttelettes d'eau dans les pièces qu'il traversait. Ils étaient aussi utilisés pour maintenir les citernes fraîches en forçant l'évaporation.

Certains *badguîrs* sont omnidirectionnels, d'autres n'ont d'ouverture que dans la direction principale des vents.



Des espaces adaptés aux saisons

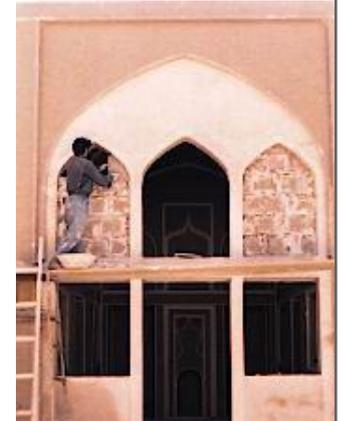
Toujours pour faire face au climat, chaud en été et froid en hiver, les maisons étaient souvent divisées en deux espaces saisonniers. Les pièces au nord de la cour étaient utilisées en hiver. Leurs ouvertures donnaient en effet au sud pour capter le plus de soleil possible. Elles étaient basses de plafond pour être chauffées plus facilement par les cheminées. Les pièces au sud, à l'opposé, avaient des ouvertures au nord qui ne laissaient pas rentrer le soleil et étaient très hautes de plafond pour favoriser la ventilation. Enfin, l'utilisation de toitures courbes permet de réduire sensiblement l'apport calorifique solaire.

Etude de cas, la maison Sistani

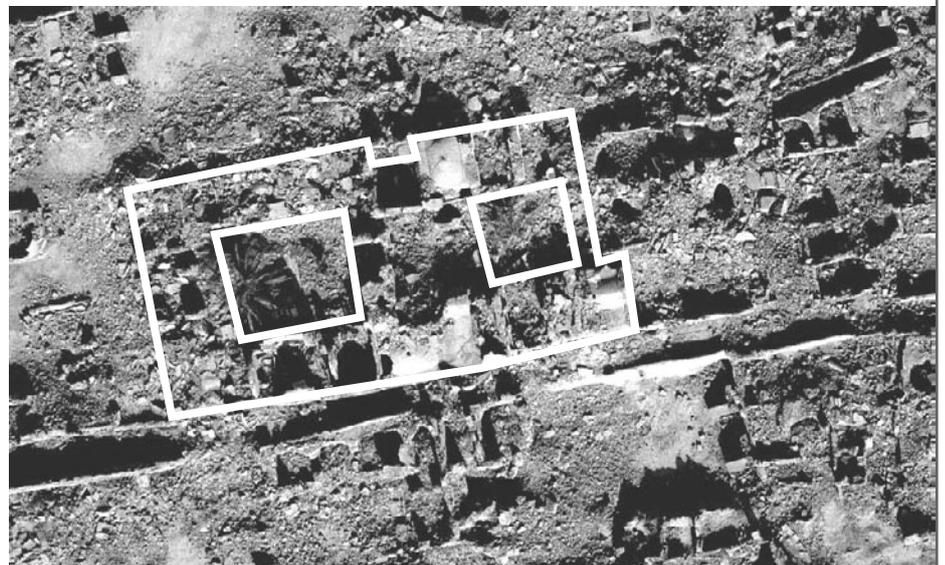
La maison Sistani a été construite au 18^{ème} siècle, visiblement d'un seul trait. C'était une habitation relativement luxueuse. Avant d'être rénovée en 1994 par l'ICHO, elle était encore en assez bon état, mis à part les tours à vent qui étaient complètement détruites.

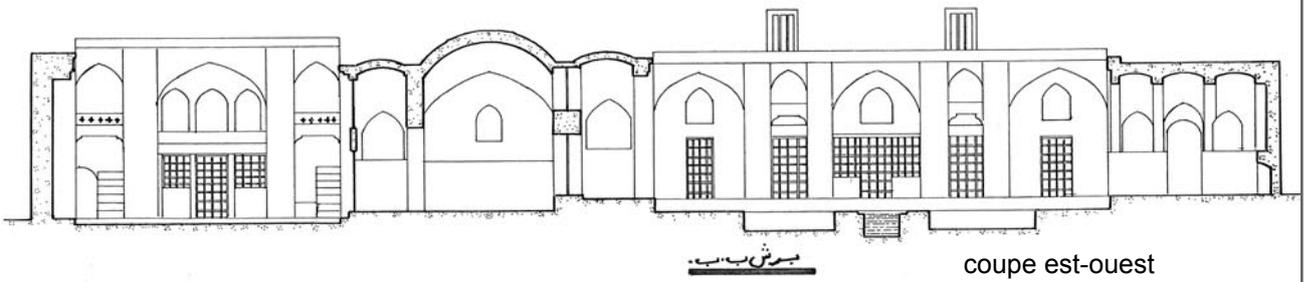
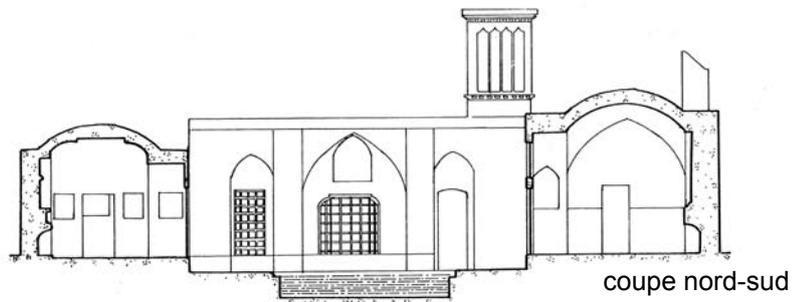
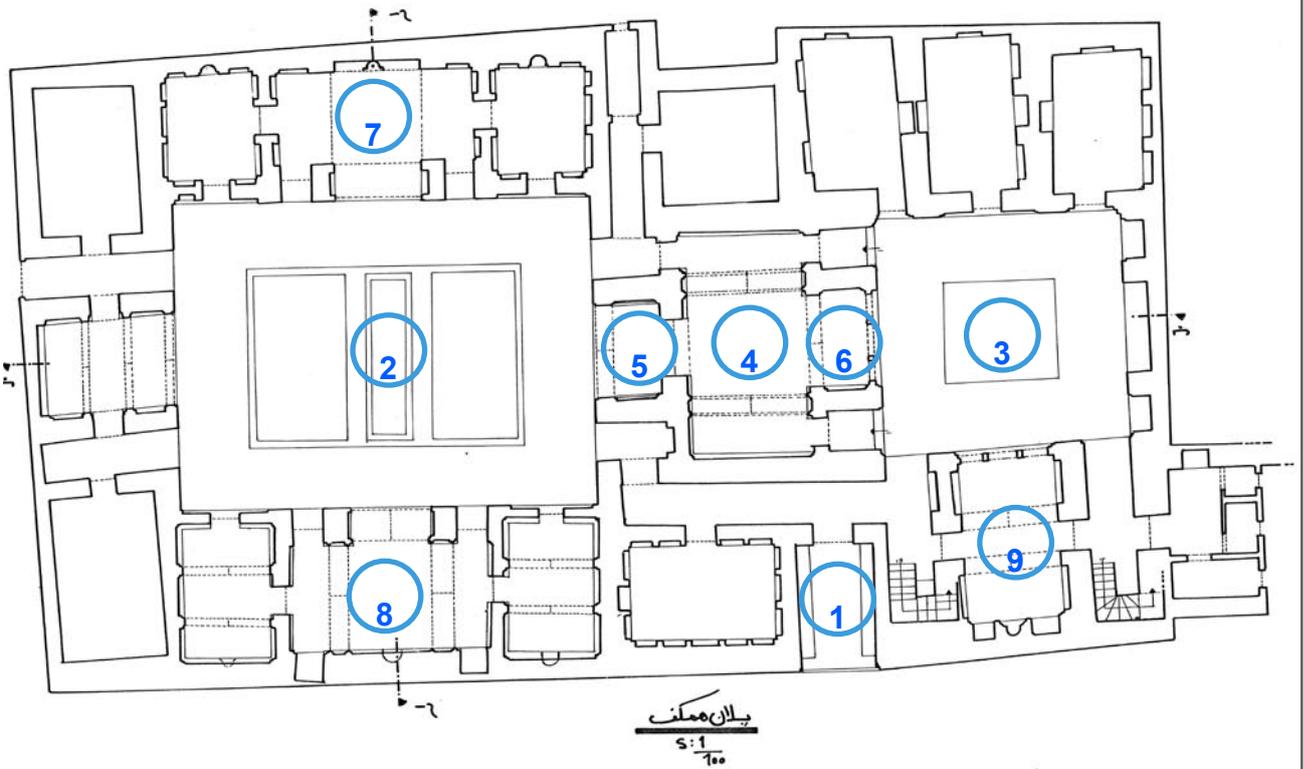


On voit ici les travaux de rénovations. Ces photos de l'ICHO sont malheureusement en très basse résolution. On ne dispose d'aucune image avant les rénovations à part celles-ci.



Elle a été complètement détruite par le tremblement de terre, à l'exception de trois voûtes en trompe d'angle et quelques morceaux de murs, comme le montrent ces photos.





10 m environ

la maison Sistani après rénovation

On peut voir sur les plans page précédente, ainsi que sur les reconstitutions ci-dessous, que la maison Sistani est un très bon exemple des principes architecturaux énumérés.

De l'extérieur, on ne voit que des façades aveugles, rythmées par les descentes d'eau de pluie en terre cuite. L'entrée (1), une des rares voûtes à avoir résisté permet donc aux visiteurs de patienter à l'ombre en s'asseyant sur les bancs maçonnés.

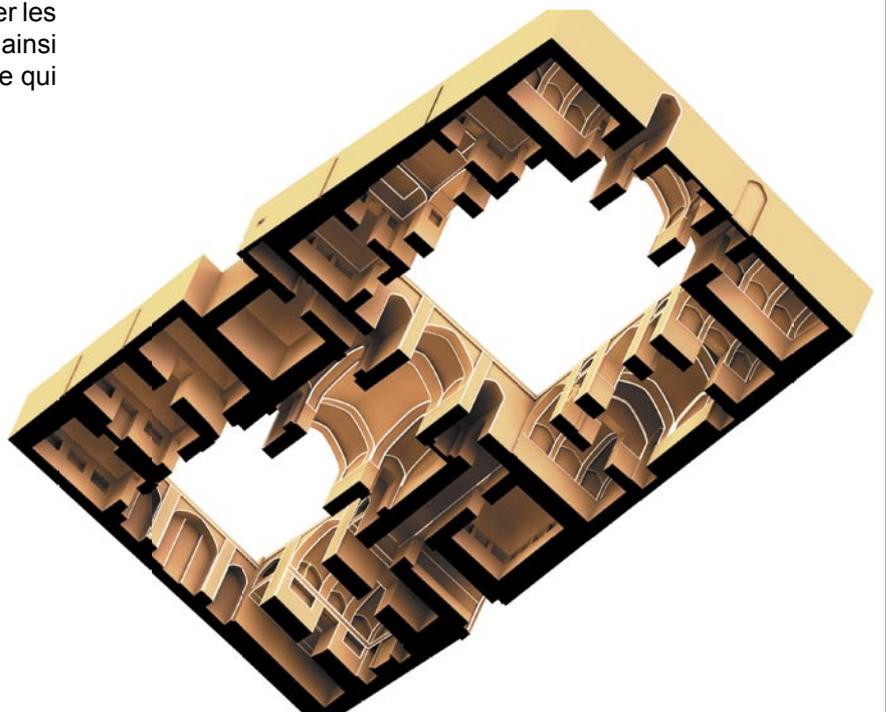
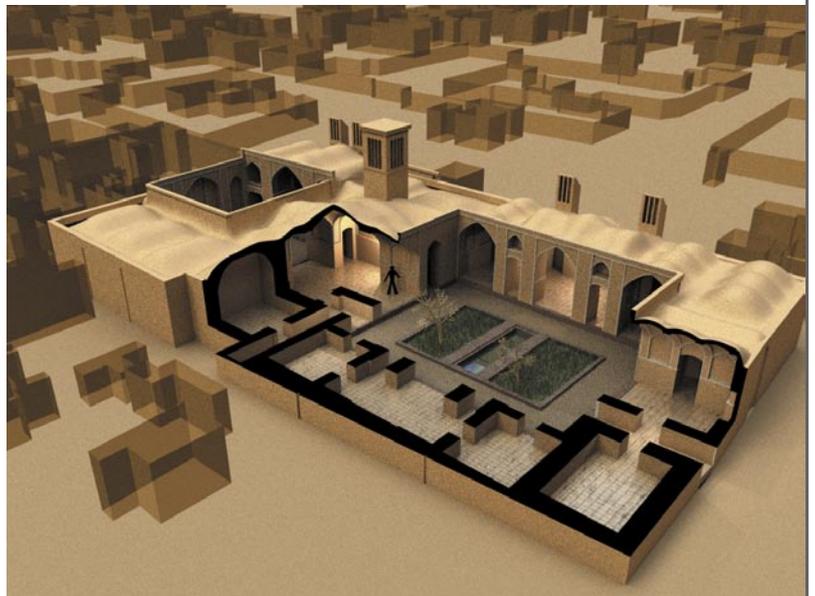
Un couloir permet ensuite de parvenir aux deux cours plantées de jardins autour desquelles s'organise la maison. La cour ouest (2) était celle réservée à la famille, l'*andaruni*. La cour est (3), *biruni*, est de taille plus modeste mais plus travaillée et avec des hauteurs sous plafond plus élevées, comme le montre la coupe est-ouest.



Au centre du bâtiment, le *talar* (4), était la seule pièce à avoir une coupole sur trompe. Le *talar* donne sur les deux cours par deux iwan voûtés (5 et 6). C'était la pièce de réception, partagée par la famille et les invités.

Les pièces principales au nord et au sud (7, 8 et 9) ont une grande ouverture donnant sur la cour, l'*orossi*, et sont flanquées de deux couloirs. En effet, les *orossi* n'avaient pas de portes et l'on était obligé d'emprunter ces couloirs pour accéder aux pièces.

On voit bien sur la coupe nord-sud la différence de hauteur entre les pièces du nord, utilisées en hiver et les pièces du sud, utilisées en été. Pour rafraîchir la maison en été, il y avait en outre quatre tours à vent uni-directionnelles qui captaient les vents du nord pour aérer les pièces principales de chaque cour, ainsi qu'une tour à vent omnidirectionnelle qui aéraient le *talar*.



II.2.3 Les cultures constructives face aux processus de dégradation

Le sujet de cette partie n'est pas de décrire les processus de dégradation ayant affecté la citadelle et ses sites associées, et ceux qui la menacent aujourd'hui. On pourra se reporter pour cela au travail de David Gandreau dans le rapport de la mission effectuée en juin 2004.

Il s'agit ici d'étudier les réponses des constructions traditionnelles à ces menaces, ce qui peut apporter de nombreuses informations quant à l'importance de ces phénomènes et aux moyens de s'en protéger. En effet, l'état de dégradation de la citadelle avant le séisme, et plus encore après celui-ci, rend difficile la compréhension de la part des dommages dus réellement à la conception et au mode de construction des bâtiments. On voit donc souvent un amalgame qui aboutit à la conclusion de la fragilité des constructions en terre, face au séisme mais aussi de manière générale.

Nous aborderons ici les principales causes de dégradation ayant menacé les constructions en terre avant le séisme, à savoir l'érosion, les pathologies humides et les termites.

Pathologies humides

Les pluies à Bam sont rares mais très violentes. Les précipitations sur l'année restent très faibles. Précipitations annuelles (en mm) :

1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
34,7	30,8	120,8	87,9	53,2	60,7	88,1	81,4	56,9	52,3	85,3

La nappe phréatique étant trop profonde (à plus de 30 m de profondeur d'après l'IIIEES) pour entraîner des problèmes de remontées d'humidité, seule la pluie et l'activité humaine peuvent causer des pathologies humides.

Il est connu que la terre comme matériau de construction craint l'eau et qu'il faut donc veiller à la protéger efficacement de la pluie et des remontées capillaires. On dit qu'un bâtiment en terre a besoin «d'un bon chapeau et de bonnes bottes».

Le bon chapeau à Bam consistait en un enduit, le kah-gel, qui recouvrait murs et toitures. La terre de Bam est particulièrement résistante à l'eau, comme l'ont montré les tests de laboratoire. L'adjonction de paille et parfois de tessons de terre cuite à l'enduit augmentait encore cette résistance. L'enduit nécessite un certain entretien et un renouvellement périodique. On peut cependant remarquer que de nombreux bâtiments n'ayant pas été entretenus pendant plusieurs dizaines d'années (plus d'un demi-siècle pour la plupart, et sûrement plus pour certains) restent en assez bon état de par la qualité même de la terre. Seule l'apparition de gouttières entraîne une érosion réellement dommageable pour le bâtiment.

Les «bonnes bottes» semblent avoir été abandonnées à Bam et ce point est très intéressant. Comme nous l'avons vu, on trouve des soubassements en matériaux durs (brique cuite et pierre) dans certains murs apparemment très anciens. On sait aussi que les Bami maîtrisaient l'usage de la chaux et de la brique cuite comme le montre la qualité de construction des hammams. Cependant, la plupart des bâtiments n'ont pas de soubassements, ni de surépaisseur à la base du mur comme c'est le cas dans certaines régions du monde où les matériaux résistants à l'eau sont trop rares ou trop coûteux. De même, certains bâtiments n'ont pas de fondation en dur, mais il est difficile de savoir si cette pratique était prédominante ou pas. La maîtrise des techniques de construction en terre dont ont fait preuve par ailleurs les Bami rend difficile à croire à des erreurs de conception généralisées.

Nous avons vu que les Iraniens, et en particulier les Bami, possédaient une très grande maîtrise de l'utilisation de l'eau, comme le montrent les qanats et les réseaux de distribution d'eau. Il semble possible que cette maîtrise se soit appliquée aux écoulements d'eau dus à la pluie, à l'échelle du bâtiment mais aussi à l'échelle d'un ensemble de bâtiments, voire de la ville entière. On trouve d'ailleurs de nombreux puits dans la citadelle. Etant donné la très faible pluviométrie de Bam, l'évacuation complète des eaux de pluie et l'élimination de toute eau stagnante aurait alors permis de se passer de soubassement résistant à l'humidité.

Il serait intéressant de savoir à ce propos si l'absence de gargouille et l'utilisation de descentes d'eau en terre cuite qui évitent les rejaillissements à la base des murs étaient des pratiques généralisées.



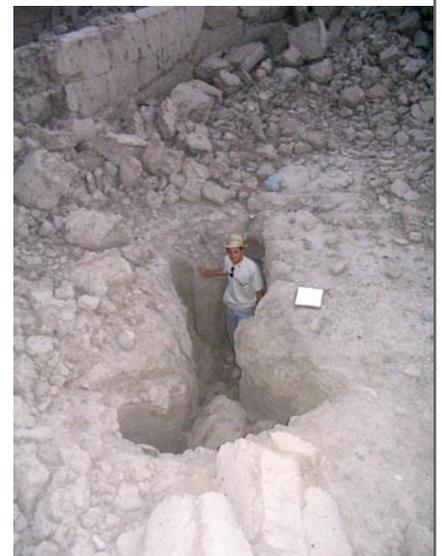
Il faut cependant remarquer que de nombreux murs ont souffert de remontées capillaires, comme ci-contre un mur intérieur de la maison Sistani. Ce point ne remet cependant pas en cause l'hypothèse évoquée.



Ces détériorations peuvent être dues au mauvais fonctionnement des circuits d'évacuation de l'eau suite à l'abandon de la citadelle ou aux travaux de rénovation, comme c'est probablement le cas de ce mur au sud des baraquements et proche du puits. Le couloir qui assurait sa ventilation a en effet été muré lors des rénovations.



Cette dégradation des circuits d'évacuation est montrée par les exemples d'érosion importante des sols à proximité des puits non-entretenus.



Termites:

La citadelle d'Arg-é Bam est infestée de termites. Celles-ci s'attaquent notamment à la paille contenue dans les adobes et le kah-gel, et l'on trouve des galeries sur l'ensemble du site.



Il a été montré qu'elles ont beaucoup fragilisé les interfaces entre couches de matériaux de différentes époques. Il semble en effet qu'elles privilégient ces endroits pour y creuser leurs galeries. Par contre, aucun élément aujourd'hui ne permet d'affirmer que leurs galeries fragilisent de manière significative les adobes ou le mortier. De manière générale, l'observation montre que les murs n'ayant pas résisté au séisme ont connu des phénomènes classiques de destruction, à savoir un décollement du mortier des adobes. Les cas où les adobes ont été écrasées ou pulvérisées montraient des signes de fortes pathologies humides qui suffisent à expliquer leur plus faible résistance. Des essais de laboratoire pourront peut-être montrer l'influence des galeries sur la résistance des adobes, mais ces tests sont difficiles à réaliser. Il faut en effet avoir des adobes attaquées et intactes de la même construction pour pouvoir les comparer, et ceci en nombre suffisant pour pouvoir tirer des conclusions.



Certains éléments peuvent laisser supposer que l'invasion des termites est postérieure à l'abandon de la citadelle. Il paraît en effet improbable que les Bami aient continué à utiliser de la paille sachant que celle-ci attirait les termites qui s'attaquent aussi aux menuiseries.

On peut donc faire différentes suppositions, soit les termites sont apparues tardivement, introduites par une des routes commerciales, soit leur présence était limitée et n'affectait pas suffisamment la ville pour que les techniques de construction changent.

On sait aussi qu'il existe une quantité incroyable de types de termites. Leur régimes alimentaires sont très complexes et variables, la plupart utilisant des champignons et auxiliaires, soit internes soit externes, pour décomposer le bois. Certaines espèces sont très difficiles quant à leur régime alimentaire, alors que d'autres attaquent toutes sortes de végétaux¹. On sait que les cultures à Bam ont changé, et que la culture du blé ne s'est généralisée qu'au siècle dernier. Auparavant, le riz prédominait probablement. Il serait possible que le changement de paille de riz pour de la paille de blé dans les adobes aie entraîné l'augmentation des problèmes de termites qui auraient été plus attirées (bien que l'on trouve des galeries de termites dans toute l'Arg).



Il est très difficile de se faire une idée de la validité de ces hypothèses. Les termites sont un problème dans de nombreuses régions du globe, mais les connaissances sur le sujet semblent limitées et surtout difficile à obtenir, à part sur le sujet de la protection.



1 - Finding alternatives to persistent organic pollutants (POPs) for termite management / UNEP, 2000
Termitologia / Pierre-Paul Grassé / Paris: Masson, 1986

II.2.4 Les cultures constructives de Bam face aux séismes

Nous aborderons dans cette partie les techniques de construction traditionnelles de Bam face au risque sismique. Les problèmes liés à une perte de savoir-faire et à la diminution de la qualité des constructions seront traités dans la partie suivante.

Comme nous l'avons vu, aucun tremblement de terre n'a été enregistré dans l'histoire de Bam. Certaines fissures dans des murs du château pourraient indiquer que Bam a subi un ou des tremblements de terre il y a très longtemps mais cette hypothèse n'est pour le moment confirmée par aucune information concrète.

On peut affirmer qu'il n'existe pas de culture parasismique dans la construction traditionnelle à Bam. Les exemples montrant une absence totale de prise en compte des effets des séismes sur les bâtiments sont nombreux. Comme nous le verrons plus loin, les sociétés ayant dû faire face à des tremblements de terre, notamment dans cette région du globe, ont toujours développé des procédés techniques renforçant la résistance des bâtiments. Etant donnée la maîtrise des constructeurs Bami, il n'en aurait pas été autrement.



Il est difficile de déterminer si une certaine culture sismique a existé et a disparu avec l'oubli des tremblements de terre précédents, ou si il n'y a jamais eu de tremblements de terre assez rapprochés dans l'histoire pour permettre l'apparition d'une telle culture. On pourra se référer à la partie II-1 sur les principes de conception parasismique pour mieux comprendre les arguments qui suivent.

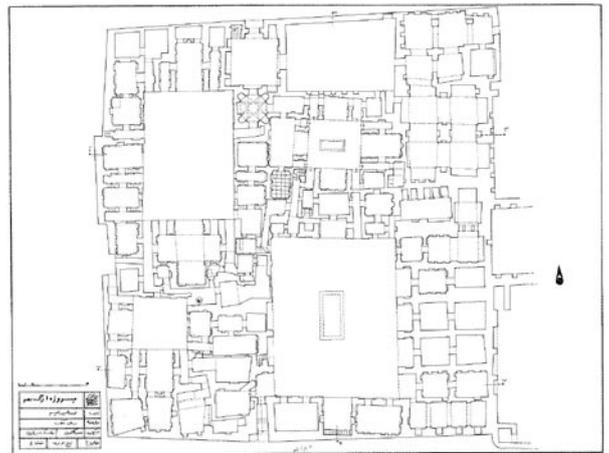
Il faut aussi garder à l'esprit que dans la citadelle, il y avait au moment du séisme deux types de structures: Des bâtiments qui n'avaient pas été entretenus pendant au moins 50 ans et montraient des graves désordres structurels et des bâtiments initialement dans le même état de délabrement mais qui avaient été rénovés sans aucune considération de résistance aux séismes. La photo ci-dessous montre clairement cette situation qui a eu une influence capitale sur le comportement des constructions de l'Arg pendant le tremblement de terre.



Une absence de culture parasismique.

La liste d'exemples ci-après est loin d'être exhaustive et cherche uniquement à appuyer cette hypothèse. Chacun de ces points ne suffit pas en lui-même à affirmer l'absence de culture parasismique, mais c'est l'ensemble de ceux-ci et leur généralisation qui le permet.

Forme des bâtiments: A Bam, et dans la citadelle notamment, on trouve un grand nombre de constructions très allongées, en L ou organisées autour d'une cour. On trouve de même en élévation des bâtiments comportant des parties de hauteur différentes sans aucune séparation. Ces types de forme sont particulièrement sensibles aux secousses sismiques.

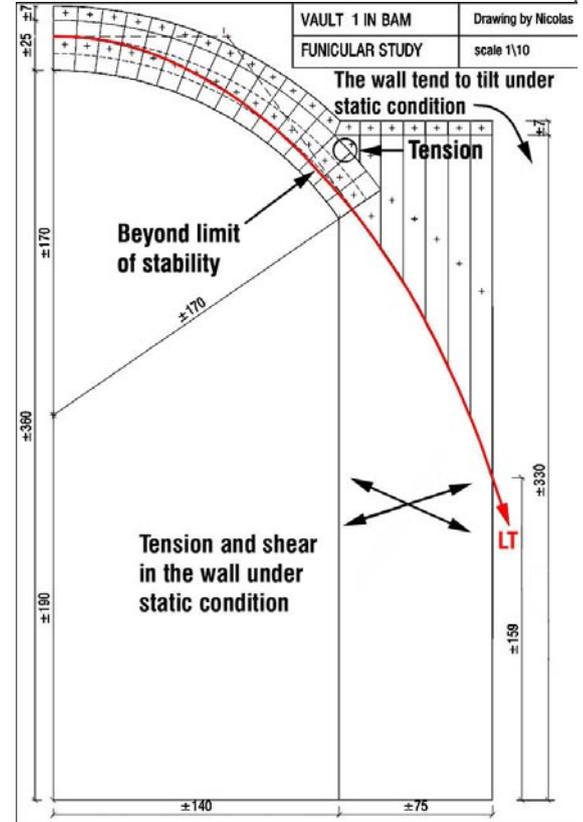
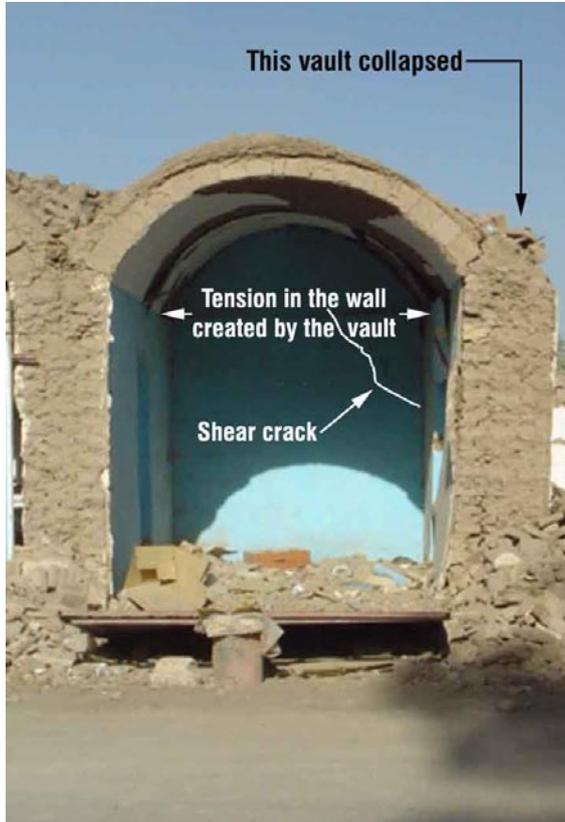


Absence de renforcements: à part dans certains bâtiments très anciens du château, on ne trouve aucune trace de chaînage ou de renforcement. La rareté du bois peut l'expliquer en partie, mais on n'observe aucune solution palliative comme les contreforts.

Masse importante des bâtiments: L'ensemble des éléments de construction est réalisé sans intention apparente de réduction de poids. Les murs sont épais, même en partie haute, et la présence de niches semble plutôt avoir un caractère ornemental que structurel. Un point important est l'utilisation des mêmes adobes pour les voûtes et les coupoles que pour les murs. L'utilisation d'adobes de dimension plus petites permet en effet d'alléger la toiture et de limiter ainsi les risques. En outre, les voûtes et les coupoles sont souvent alourdies par une forte épaisseur d'enduit et par des remplissages pleins.



Utilisation de structures en limite de stabilité: comme l'a montré la mission de Serge Maini, de nombreux arcs, voûtes et coupoles sont en limite de stabilité à l'état statique. La maîtrise des techniques de franchissement des constructeurs Bami leur a sans doute permis de réaliser ces structures en connaissance de cause, mais elles ne sont en aucun cas adaptées aux contextes sismiques.



Voûtes à bords libres: de nombreuses voûtes possèdent un bord libre en façade, et sont remplies par dessous par un mur pignon qui n'est pas solidaire de la voûte. Ce mode de construction a le plus souvent entraîné la chute de plusieurs rangées de briques en extrémité.



On peut en outre remarquer la présence de nombreux éléments principalement décoratifs présentant un fort risque de chute, comme les acrotères en façade de cour.

Quelques éléments positifs

Cependant, malgré tous les points évoqués ci-dessus, de nombreux bâtiments en terre de Bam ont bien résisté au tremblement de terre. Il est donc intéressant d'essayer de comprendre ce qui, dans leur conception ou leur construction, a permis cette résistance.

Qualité générale des constructions : Comme nous l'avons vu en II.1, le savoir-faire est un point fondamental pour assurer une bonne résistance des bâtiments aux séismes. La qualité d'exécution de bon nombre de constructions à Bam montre une très grande maîtrise des techniques de maçonnerie et de construction en terre, avec notamment une variété et une qualité de calepinages impressionnantes.

Rareté des bâtiments à étage : même si cette caractéristique trouve très probablement son origine dans des considérations plutôt climatiques, économiques ou sociales, l'absence d'étage limite grandement les risques d'effondrement.

Stabilité de forme : les bâtiments sur plan carré et encore plus sur plan rond ont une résistance accrue de par leur forme, même si les murs ronds en maçonnerie devraient plutôt être évités. La résistance des quelques exemples de bâtiments sur plan rond a cependant été exemplaire. La glacière a beaucoup souffert du tremblement de terre, mais était auparavant très endommagée et avait été lourdement restaurée.



Utilisation de coupoles : celles-ci, par l'absence de bords libres ont un comportement bien meilleur que les voûtes. En cas de réalisation très soignée, leur comportement se rapproche de celui d'une coque, particulièrement stable, comme le montrent les exemples ci-dessous où les coupoles ont résisté malgré l'écroulement de leur support.



Orientation des bâtiments : même si ce point n'est pas directement lié aux cultures constructives, il est important de rappeler que l'orientation des constructions par rapport à la direction principale des ondes sismiques a une importance capitale et a sûrement beaucoup joué dans la résistance de certaines constructions.

On voit donc qu'il est possible d'utiliser de nombreuses solutions techniques traditionnelles de Bam, qui ne sont pas intrinsèquement incompatibles avec une conception parasismique, voire qui sont particulièrement résistantes. Il sera cependant nécessaire de les améliorer à l'aide de solutions provenant d'autres cultures et ayant fait leurs preuves. Cette absence de culture sismique n'implique en aucun cas une rupture de la continuité des cultures constructives de Bam pour assurer leur caractère parasismique.

II.2.5 Etat des lieux de la construction en terre aujourd'hui à Bam

Malgré l'image négative qu'elle peut parfois avoir, la terre est encore utilisée aujourd'hui à Bam dans la construction, que ce soit bien sûr pour les travaux de rénovation de la citadelle, ou pour la construction d'habitations principalement dans les villages alentour. Cependant, l'apparition des techniques de construction dites modernes et l'évolution de la société iranienne ont eu une grande influence sur cette activité traditionnelle.

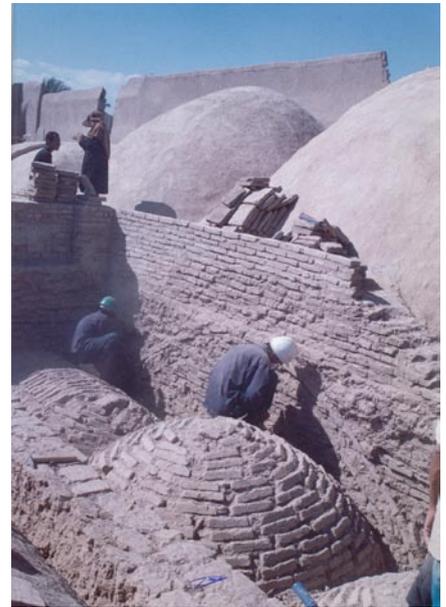
On doit en effet remarquer que la construction en terre n'est pas enseignée dans les filières d'apprentissage officielles, que ce soit au niveau pratique ou théorique. En outre, le schéma traditionnel d'apprentissage auprès d'un maître a pratiquement disparu.

Il est nécessaire de dresser un état des lieux de la construction en terre aujourd'hui à Bam avant de pouvoir aborder un projet de construction utilisant cette technique.

L'utilisation de la terre pour l'habitat ne se rencontre pratiquement plus que dans les villages autour de Bam. Il s'agit le plus souvent d'autoconstruction. Il n'existe visiblement plus de maître-maçon travaillant professionnellement à la construction de coupes et voûtes en adobe. Les 7 derniers en activité ont en effet tous été embauchés par l'ICHTO pour les travaux de rénovation, même si certains effectuent quelques travaux en dehors. Tous leurs apprentis sont donc des employés de l'ICHTO et il est peu probable que le savoir-faire restant puisse ainsi sortir du cadre de la rénovation des monuments historiques.

Tous leurs apprentis sont donc des employés de l'ICHTO et il est peu probable que le savoir-faire restant puisse ainsi sortir du cadre de la rénovation des monuments historiques.

Nous allons décrire ici ce que les observations ont pu relever dans le domaine du choix du matériau, de la production des adobes et de leur mise en œuvre aujourd'hui principalement à l'ICHTO. Cet état des lieux a peu de chance d'être plus positif dans la ville de Bam.



Matériau:

Les adobes produites par l'ICHTO sont réalisées avec une terre provenant d'une carrière utilisée pour la production de briques cuites. Il était en effet impossible d'extraire la terre sur le site historique. Cette carrière a été choisie par le fabricant d'adobes le plus expérimenté de l'ICHTO parmi plusieurs carrières existantes. Ce choix s'est effectué par un simple test de toucher du matériau. Les tests de terrain et de laboratoire effectués sur cette terre montrent qu'elle est tout à fait adaptée à la production d'adobes, même s'il semble exister à Bam des terres de meilleure qualité.



Par contre, l'interview d'un des producteurs d'adobe a montré que malgré une bonne connaissance du matériau, des idées arbitraires ou empiriques venaient contredire un certain savoir-faire. Par exemple, l'adjonction de paille à la terre a été décrite comme n'ayant que des effets négatifs sur la résistance des adobes.

Un travail d'enquête complet permettrait de donner des informations plus représentatives.

En dehors de l'ICHTO, la terre est prise en général sur les lieux même de construction. La perte de savoir-faire est ici beaucoup plus frappante, les habitants utilisant souvent la couche arable de la terre malgré la présence de nombreuses racines et éléments organiques, en tout cas pour la réalisation des murs de clôture en *chiney*.



Production:

Les producteurs d'adobes sont formés en deux ans de pratique.

On constate au niveau de la production des adobes de grosses lacunes, qui sont mises en évidence par le fait que les employés de l'ICHTO ont du mal aujourd'hui à faire des adobes de plus de 20cm de côtés sans fissuration. L'utilisation de paille ne suffit pas à expliquer qu'avec une terre sensiblement identique il ait été possible de fabriquer des adobes de 40 cm de côté.



L'observation du processus de production a permis d'identifier certains problèmes expliquant en partie le manque de qualité général des adobes récentes:

La terre sèche formant un tas en forme de cuvette est recouverte d'eau puis laissée à reposer pendant une période variant d'une journée à trois ou quatre jours. Etant donné la forte résistance à l'imprégnation de la terre à Bam, une journée de repos ne suffit pas à obtenir un mélange imprégné d'eau de manière homogène. Une partie de la terre (suffisante pour réaliser une centaine d'adobes) est ensuite mélangée avec une nouvelle quantité d'eau à la pelle puis directement placée dans les moules. Le mélange reste donc peu homogène, avec une partie de la terre dont les argiles ont eu du temps pour gonfler et l'autre non. Le remplissage des moules n'est pas complet, laissant souvent des creux propices à l'apparition de fissures. Une fois démoulées, les adobes sont laissées à sécher parfois en plein soleil, sans être plus tard posées sur la tranche pour permettre un séchage uniforme.



Mise en œuvre:

Comme nous l'avons vu plus haut, 7 maîtres maçons sont employés par l'ICTO. Ces maîtres maçons, pour ceux qu'il a été possible d'interviewer, ont été formés par leur père. Cette formation nécessite plusieurs années de pratique en tant qu'apprenti avant d'être capable de superviser une équipe de maçons pour la construction d'une coupole. Ils travaillent avec de nombreux aide-maçons, qui ne sont en général que très peu qualifiés.

Il semble que les maîtres maçons se chargent de la réalisation des voûtes et coupoles, alors que la plupart des murs sont montés par les aide-maçons ou des employés sans qualification particulière.

Le manque de qualité général des murs réalisés pour la rénovation montre clairement le manque de savoir-faire de la majorité des employés.

L'appareillage des murs est la plupart du temps mal réalisé comme le montre l'exemple ci-contre.



Il est fréquent de trouver des joints verticaux qui ne sont pas remplis. En outre, l'utilisation de mortiers trop liquide est indiquée par la forme caractéristique que montrent les joints.



La réalisation des voûtes et coupoles est en générale plus soignée, étant confiée aux maître-maçon, mais on doit quand même constater une diminution de la qualité de celles-ci. De même, on observe globalement un manque de soin dans le traitement des joints.



Certains maçons savent encore faire des voûtes sur trompe d'angle, comme l'atteste cet exemple de rénovation de la maison Ameri.



Cependant, dans de nombreux autres cas, l'appareillage traditionnel est remplacé par un appareillage qui se rapproche de celui d'une voûte en auge, avec des assises verticales montées au plâtre après des coins montés en assises horizontales.



Photo maçons: Miss Jafary

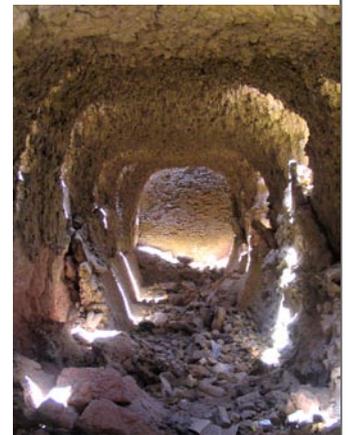
II.2.6 Les constructions dites «standard»

Que se soit pour les opposer, comme c'est souvent le cas, ou pour les associer, on ne peut parler des principes constructifs traditionnels et de leur éventuelle adaptation au contexte actuel sans décrire rapidement l'utilisation des matériaux de construction dits standard à Bam.

Dans la grande majorité des cas, ils s'agit de structures porteuses avec un remplissage en briques cuites, pleines le plus souvent mais parfois extrudées.



Les briques pleines étaient encore produites à Bam dans des fours à ciel ouvert fonctionnant à l'huile usagée. Celles-ci avaient donc une qualité variable, les meilleurs étant au centre du four, les moins bonnes à l'extérieur. On voit ci-dessous le tas de briques déjà cuites au dessus de l'accès à la chambre de combustion, et ci-contre la chambre de combustion.



Les granulats sont toujours produits en périphérie de la ville à un coût relativement faible dans les anciens lits de rivière.



On peut malheureusement constater que de manière générale ces techniques ne sont pas mieux maîtrisées que les techniques traditionnelles. Ainsi, on a des structures qui ont très bien résisté et de très nombreux bâtiments qui se sont effondrés.



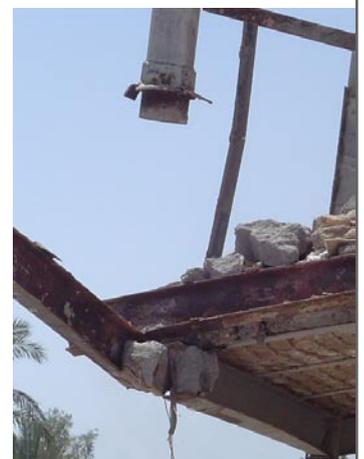
Structure en béton armé

Les points de faiblesse de ces structures sont en général les liaisons entre poteaux et poutres, et la mauvaise liaison entre la maçonnerie de remplissage et la structure.



Structure en métal

Ce type de construction est le plus courant à Bam. La très mauvaise résistance de nombre de ces bâtiments est due notamment au mode d'assemblage de la structure, qui est entièrement soudée. Une soudure résistante demande en effet un grand savoir-faire. Le lien entre la maçonnerie et la structure est la plupart du temps inefficace comme le montrent les nombreux exemples où il ne reste que le remplissage.



Conception des bâtiments

On observe pour ces deux techniques, comme pour le secteur de la construction en entier, un manque général de qualité de conception des bâtiments (que l'on distinguera des défauts de construction provenant de la faible qualification des ouvriers du bâtiment à Bam évoqués ci-dessus). Cependant, l'absence de connaissance du risque sismique explique certaines solutions retenues.

De nombreux bâtiments ont des porte-à-faux importants ou des différences de niveau et une absence totale de symétrie en plan. Les étages sont en général aussi lourds que les rez-de-chaussée et l'on rencontre même des étages lourds sur des structures légères en métal.



On voit très fréquemment une insuffisance des contreventements des structures porteuses, voire leur absence.



Enfin, on voit très souvent des mélanges de techniques et de matériaux, comme dans cette exemple où un mur en *chiney* est intégré dans un bâtiment en métal remplis d'adobes.



L'habitat d'urgence

On ne pouvait s'attendre à une amélioration subite des pratiques après le tremblement de terre. Cependant, la nécessaire rapidité de construction des abris d'urgence semble avoir souvent fait empirer la situation. Si on ne peut espérer une qualité de conception élevée dans ce genre de processus, les abris qui ne sont pas préfabriqués montrent un manque de qualité d'exécution alarmant. Le fait que ces constructions soient en général faites de matériaux légers et ne disposent pas d'étage diminue cependant la gravité des risques.



Réflexions sur la construction standard pour l'après-séisme

Malgré ce constat très négatif, on observe des bâtiments bien réalisés qui ont en général résisté au tremblement de terre. Les savoir-faire existent bien, mais comme nous l'avons vu plus haut, et comme semblent le confirmer les abris d'urgence, le besoin important de main d'oeuvre et la précipitation des reconstructions ne vont probablement pas laisser le temps pour la transmission de ces savoir-faire et leur mise en pratique correcte. Les questions abordées dans le paragraphe I-4 sur la problématique de ce travail s'appliquent souvent aussi bien au secteur dit traditionnel de la construction qu'au secteur dit standard.

Il est heureux de constater que de nombreuses institutions et entreprises sont conscientes du problème et ont commencé à tirer des conclusions du désastre. Ce point n'étant pas le sujet de mon mémoire, je ne donnerai qu'un exemple, qui peut par ailleurs avoir un intérêt vis-à-vis de la construction en terre.

Il s'agit d'un travail de recherche effectué sur le bâtiment de la poste de Bam par H. Mostafaei et T. Kabeyasawa pour le Earthquake Research Institute de l'Université de Tokyo. Ce bâtiment est construit en ossature béton avec remplissage en brique. Il a très bien résisté au séisme, avec seulement l'apparition de quelques fissures, et une performance presque linéaire. Les auteurs se sont intéressés au fait que ce bâtiment, d'après les règles de dimensionnement des normes parasismiques iraniennes, et donc sans considérer les remplissages en brique, aurait du subir des dommages bien plus importants. Ils ont donc créé des modèles numériques du bâtiment, en proposant plusieurs hypothèses de comportement du remplissage en brique, comparant chaque modèle avec le comportement réel du bâtiment.



II.3 La construction en terre parasismique à travers le monde

La notion de culture constructive a été abordée dans le paragraphe I.3.1 de la problématique. Nous avons par ailleurs vu en II.2 que l'on ne peut pas parler de culture constructive parasismique à Bam. Pour répondre aux contraintes du projet, il faudra donc faire évoluer les techniques connues à Bam.

Dans de nombreuses régions du globe, les populations ont dû faire face au risque sismique et ont su adapter leurs techniques pour protéger les bâtiments et leurs occupants, notamment en utilisant la terre crue. On pourra donc s'appuyer sur ces cultures pour y puiser des solutions adaptables au contexte de Bam.

Des programmes de recherches existent, visant à développer soit des techniques parasismiques utilisant la terre et aux contraintes modernes soit des normes de construction parasismique prenant en compte les qualités du matériau. On pourra donc s'appuyer sur les très nombreux travaux et parutions qui existent aujourd'hui sur ce sujet et qui bénéficient des expériences d'une large communauté scientifique de par le monde.

De nombreuses solutions expérimentales de construction en terre parasismique ont été développées sans avoir été l'objet de véritables programmes de recherche. Même si ces projets sont souvent restés à l'état de prototypes, ils fournissent de nombreux exemples intéressants des possibilités du matériau terre en zone de risque sismique.

La suprématie actuelle des matériaux dit modernes ou standards dans les constructions neuves en zone urbaine et dans les pays dit développés est évidente. Le fait que les normes parasismiques ne prennent pas en compte les possibilités des matériaux traditionnels va dans le sens de leur disparition en zones sismiques. On trouve cependant de nombreux exemples de bâtiments contemporains réalisés en terre en zone sismique, certains ayant même déjà résisté à des séismes.

II.3.1 Solutions vernaculaires

Les exemples fournis dans cette partie sont tous des structures en terre construites dans des régions où le risque sismique était visiblement connu des populations qui ont su faire évoluer les réponses techniques pour protéger les bâtiments et leurs occupants. Certains ont déjà résisté à des séismes.

Il faut signaler l'importance du patrimoine de maçonnerie en pierre parasismique, patrimoine qui a par ailleurs été très documenté, notamment en Italie pour des raisons de restauration. De nombreuses solutions sont partagées par ces deux matériaux et il est intéressant de s'y référer.

Au niveau du matériau lui-même, on trouve des constructions vernaculaires en zones sismiques utilisant les principales techniques de construction en terre, à savoir le pisé, l'adobe, le torchis et la bauge. Le choix de la terre et sa mise en oeuvre sont toujours importants et un grand savoir-faire dans ces domaines est généralisé. A part dans le pisé, l'utilisation de fibres végétales (paille) est très commune, permettant d'alléger le matériau et de réduire les fissures et micro-fissures.

Les solutions vernaculaires et leurs variations sont innombrables, mais on peut remarquer trois familles que l'on retrouve souvent utilisées conjointement. Il ne faut cependant pas négliger le fait que ces solutions typiques qui peuvent sembler simples ne fonctionnaient que grâce à un savoir-faire et une expérience qui garantissaient une conception adéquate et la bonne qualité des réalisations. Les formes des bâtiments étaient donc souvent régulières, le plus proche du cube possible, avec des faibles hauteurs et aucun décroché ni horizontal ni vertical.

On ne trouvera ici que des exemples ayant fait l'objet d'études ou de recherches, ceci afin d'en limiter le nombre. Ils seront cependant suffisants pour illustrer ces trois familles et la diversité des contextes dans lesquels elles ont été utilisées.

Stabilité par la masse

C'est ici la maîtrise de l'élançement qui donne sa stabilité au mur. Ce type de solution est la plupart du temps associé à une conception très massive, avec des murs de faible hauteur et de faible longueur par rapport à leur épaisseur. Pour des murs plus hauts, l'utilisation de formes prismatiques (fruit très prononcé) permet de limiter l'inertie des parties hautes de l'édifice.

Une évolution plus courante de cette technique est le contrefort, qui permet de stabiliser le mur tout en limitant la quantité de matériaux utilisés, et donc la masse et le coût de la construction.

Renforcements

Le mur est ici composite, la faible résistance à la traction de la terre étant compensée par des éléments en bois la plupart du temps, formant des renforcements horizontaux et verticaux. La résistance de l'ensemble dépend beaucoup de la compatibilité de comportement de la structure en bois et du mur en terre, ainsi que de la répartition des éléments en bois et de leurs assemblages. Un soin spécial est toujours apporté aux ouvertures.

Structures légères

Celles-ci sont faites en torchis, une structure en bois avec un remplissage en terre, suivant les différentes techniques locales. Souvent, lors des séismes, le remplissage en terre fissure, sans danger pour les habitants étant donné la faible taille des débris, alors que la structure en bois reste intacte. Il suffit de refaire le remplissage ensuite. La destruction du remplissage permet en outre d'absorber une partie de l'énergie du bâtiment limitant ainsi les effets sur la structure.

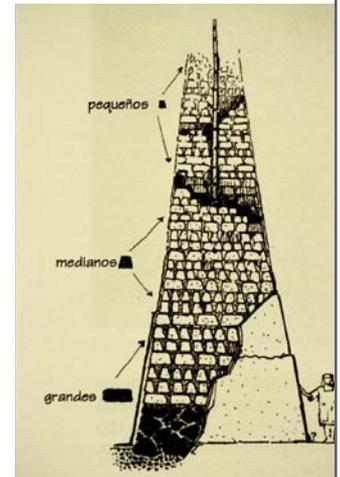
Les exemples les plus intéressants comportent un rez-de-chaussée lourd, en pisé, adobe ou pierre, et un étage léger en torchis.

Les Incas au Pérou, culture parasismique précolombienne

Ces exemples sont typiques de la stabilité par la masse. Les renforcements en bois y sont en effet peu nombreux. Malgré l'apparente simplicité du système, le nombre et la taille des ouvertures montre sa parfaite maîtrise.

La région de Cusco a subi de nombreux séismes, dont un très destructeur en 1650.

Le site de Wiracocha dont les vestiges actuels datent des incas (15^{ème} siècle) est situé à 125 km de Cusco. Le mur le plus haut du temple faisait plus de 15m, les adobes, trapezoidales ont trois tailles différentes, devenant plus petite en haut des murs. Le souci de faciliter les manipulations en hauteur peut l'expliquer, mais cela pourrait aussi montrer que les incas savaient que des adobes de grandes dimensions amélioreraient la résistance aux séismes. Les adobes sont renforcées avec de l'*ichu*, paille locale, placée dans le sens longitudinal. Les linteaux sont constitués de deux poutres de forte section.



Les premières installations sur le site de Pachacamac date du 3^{ème} siècle, mais ce que l'on en voit aujourd'hui est inca et date du 15^{ème} siècle. Les récits incas parlent de secousses ayant eu lieu à Pachacamac peu avant l'arrivée des espagnols, Pachacamac étant le dieu des tremblements de terre. En 1746, un violent séisme a détruit une grande partie de la ville coloniale de Lima, avec visiblement peu d'effets sur le site pourtant situé juste au sud de la ville.



En Ouzbékistan

De nombreuses constructions sont en adobes avec des chaînages. Ceux-ci sont particulièrement soignés au niveau de leur jonction avec les planchers.

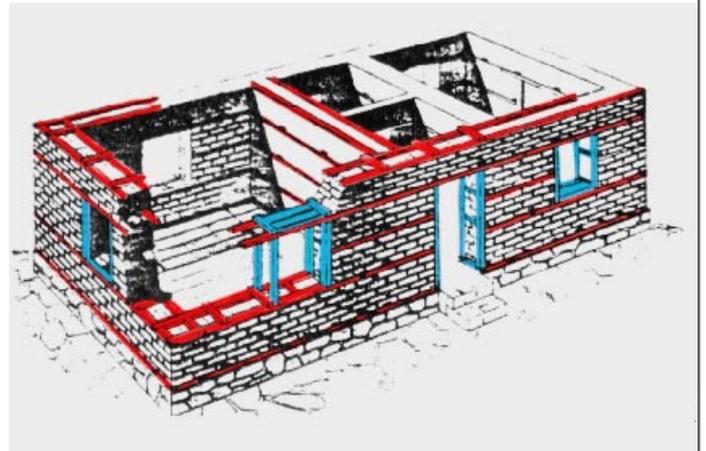
Ces techniques sont encore utilisées aujourd'hui.



En Turquie

Dans la région d'Erzincan, durant le tremblement de terre de 1992, de nombreuses structures non renforcées ont bien résisté de par leur bonne conception et construction (Erdick and Gulkan, 1993).

Cependant les chaînages en bois sont très courants. Les ouvertures renforcées par des bois de forte section sont intégrées au chaînage qui est ainsi continu sur l'ensemble de la construction.



Cette maison construite selon ce principe a résisté au tremblement de terre d'Irpinia en 1981 (Ms=6,9).



Sur celle-ci, après le tremblement de terre de Gediz en 1970, on voit que malgré des mouvements de sols importants comme le montre la rupture en rouge, les fissures dans les murs ont été arrêtées par les renforcements en bois.

A Cuba



Cette maison a un rez-de-chaussée en pierre et un étage en torchis



Maison en adobe avec contreforts

Au Brésil

Cette maison à Ouro Preto a un rez-de-chaussée en pisé et un étage en torchis, dont on voit un détail de la structure sur la photo de droite.



II.3.2 Programmes de recherche

Programme de recherche CET, UNI, Pérou - Espagne

Ce programme de recherche s'est déroulé de 1988 à 1993 en collaboration entre:

- l'UNI (Universidad Nacional de Ingeniería - Pérou)
- le centre péruano-japonais de recherche sismique et limitation des désastres (Centro peruano-japones de investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, Pérou)
- l'institut des sciences de la construction Eduardo Torroja (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Espagne)

Le programme, initié par le Pr Olarte de l'UNI, visait à développer un système de construction modulaire et adaptable, pour pouvoir construire des bâtiments parasismiques à faible coût jusqu'à deux étages. Les recherches sur les systèmes structurels ont conduit au choix de la terre comme matériau de construction.

Ce système, appelé CET (Componentes Estructural de Tierra - Composants Structurels en Terre) a été validé par des tests sur table sismique à échelle réduite sur plusieurs prototypes, et quelques maisons ont été construites en l'utilisant. Un manuel de conception et construction (Edificación con tierra armada) a été édité en Espagne en partenariat avec l'institut des sciences de la construction Eduardo Torroja.

Le rez-de-chaussée est composé d'éléments en pisé indépendants et autostables. Pour cela, ils sont de faibles dimensions, et possèdent tous un angle à 120°, servant de contrefort. Ils fonctionnent sur une trame triangulaire, et peuvent être combinés pour former différents types de bâtiments. Ils ne comportent pas d'ouvertures, celles-ci étant faites entre murs trumeaux.

L'étage est réalisé en torchis, c'est-à-dire avec une structure en bois remplie en terre. Ce sont de même des éléments modulaires, qui peuvent comporter des ouvertures. Le plancher entre les deux niveaux est réalisé en bois et joue le rôle d'un diaphragme semi-rigide. La toiture légère est posée sur un diaphragme identique à celui entre les deux niveaux.

Ce programme est une évolution intéressante des systèmes traditionnels en pisé et torchis, cherchant à les rationaliser et à les améliorer pour les adapter à des contraintes de coût et de facilité de construction. On peut déplorer qu'il n'ait été finalement que peu mis en pratique. Une des raisons en est probablement l'utilisation de formes trop éloignées des formes traditionnelles pour être appropriées par les populations. L'importance et la difficulté de cette appropriation ont été décrites dans le paragraphe I.3 sur les cultures constructives.



le prototype



Construction d'une maison CET

Getty Seismic Adobe Project - Etats Unis d'Amérique

Ce programme de recherche s'est déroulé de 1992 à 2004 à Los Angeles, au Getty Conservation Institute. Les douze années de recherche ont été consacrées à la réhabilitation sismique rétroactive du patrimoine construit en adobe et ont abouti à 3 publications :

- Survey of damage to historic adobe buildings after the January 1994 Northridge Earthquake (1996)
- Seismic stabilization of historic adobe structures (2000)
- Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Retrofitting of historic adobe structures (2002)

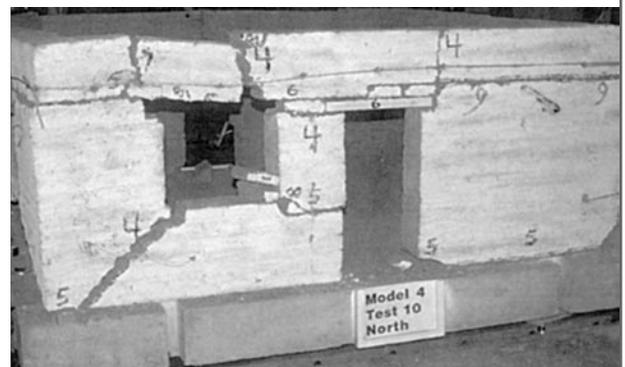
Le programme a comporté de nombreux essais sur table sismique de prototypes en adobe dans le but de comprendre le comportement de ces structures, l'expérience et l'observation montrant que les règles de calcul standard, notamment dans les normes, ne pouvaient pas s'y appliquer.

Le résultat le plus intéressant concerne les conclusions qu'ils ont tirées sur le comportement des structures en adobe, notamment sans renforcement. Pour résumer, on peut dire que les bâtiments en adobe résistent par dissipation d'énergie, leur résistance et leur élasticité très faible étant connue. Alors que l'on calcule souvent les structures pour qu'elles résistent, les fissures apparaissant dans les murs en adobes permettent de dissiper une grande quantité d'énergie, et dans une seconde phase, les frottements entre les différents «morceaux» de la structure continuent à absorber de l'énergie.



La plupart des prototypes testés, même avec des secousses de forte intensité, pouvaient être considérés comme détruits dans la mesure où l'importance des fissures les rendaient incapables de résister à un autre séisme, mais ils ne s'étaient pas effondrés, remplissant ainsi leur rôle le plus important, à savoir protéger les occupants.

Ces résultats permettent d'aborder la conception de structures en adobe en région sismique dans l'optique de protéger les personnes mais pas la structure elle-même. Cette approche n'est bien sûr pas applicable à tous les contextes. Mais dans le cadre notamment de constructions économiques et rapides à construire utilisant un matériau très bon marché, elle est à mettre en regard de la probabilité sismique parfois très faible (aucun séisme enregistré dans l'histoire de Bam par exemple).

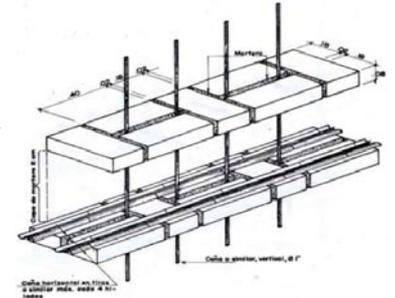


Un des prototypes après essais

Programme de recherche Adobe - Pérou

Ce programme, commencé en 1972 à la PUCP (Pontifical Universidad Católica de Peru) à Lima continue encore aujourd'hui. Il a connu plusieurs phases mais est toujours resté centré sur l'amélioration de la résistance aux séismes des constructions en terre.

Durant la première étape, ils ont expérimenté l'utilisation de matériaux disponibles localement en région rurale pour le renforcement des constructions en adobe. Les modules étaient testés sur un plan inclinable, et certains testés à échelle 1 avec des charges latérales. En conclusion, l'utilisation de renforcements intérieurs verticaux et horizontaux en cane a permis de doubler la résistance aux charges horizontales et de diviser par 6 le déplacement latéral en haut de mur par rapport à un mur sans renforcements.



En 1979, en collaboration avec l'UNAM (Université autonome de Mexico), ils ont étudié l'influence de la qualité du sol utilisé et des différents additifs possibles sur la résistance des adobes et du mortier. Des tests de compression axiale, traction, compression diagonale et cisaillement à l'échelle 1 ont été effectués. Les résultats ont montré que pour des sols donnant une résistance à la compression axiale similaire, la résistance à la compression diagonale de murets test pouvait varier de l'ordre de 500%. Il a été confirmé par ailleurs l'efficacité des pratiques utilisées traditionnellement, à savoir l'adjonction de sable aux sols trop riches en argile, l'utilisation de la paille, et le fait de laisser reposer la terre mouillée au moins 24 heures.

A l'aide d'une table sismique, 8 modules à échelle 1 ont été testés en 1992 pour valider l'efficacité des renforcements en cane et déterminer les configurations d'ouvertures optimales. Ils ont ainsi confirmé que la qualité du travail de maçonnerie avait une grande influence sur la résistance de la structure avant fissuration (jusqu'à 200% de variation) mais peu d'effet sur le comportement après fissuration. En outre, l'utilisation de chaînage haut en plus des renforcements en cane permet, pour des séismes de forte intensité, d'éviter l'effondrement de la structure, même si celle-ci peut être considérée comme détruite.



Ils ont ensuite testé des méthodes de renforcement de bâtiments existant, pour améliorer le comportement parasismique et retarder l'effondrement. Les tests ont porté sur des murs en U renforcés par des grillages soudés cloués au mur et recouvert d'enduit au ciment. Cette solution s'est avérée très efficace pour retarder l'effondrement à défaut de l'empêcher.



Ils travaillent actuellement sur l'utilisation de matériaux industriels à faible coût comme renforcement. En effet, les grillages soudés et le ciment sont inaccessibles à une partie de la population. Et pour les programmes de reconstruction à grande échelle suite à des séismes, l'utilisation de la cane est rendue impossible par la quantité à fournir en une courte période. Un programme de recherche préliminaire a donc étudié l'efficacité des trois solutions suivantes:

- des tubes PVC comme renforcements verticaux combinés à des filets plastiques comme renforcements horizontaux,
- quatre fers à béton comme renforcements verticaux dans les coins,
- de filets géotextiles fixés sur la face extérieure du mur.

Ces solutions ont été comparées à un prototype sans renforcements, un renforcé avec de la cane et un renforcé avec du grillage recouvert d'enduit ciment. Les premiers résultats ont montré l'inefficacité des fers à béton. Les grillages recouverts de mortier au ciment semblent être les plus efficaces mais avec des possibilités de comportements post-élastiques instables conduisant à un effondrement brusque. Les renforcements horizontaux en filets plastiques ont une efficacité semblable à celle des renforcements en cane. Un véritable programme de recherche avec essais sur table sismique permettrait de confirmer ou infirmer ces hypothèses.

Plusieurs projets pilotes ont été construits au cours de ces recherches, et certains des résultats, comme l'utilisation de la cane comme renforcement, ont été utilisés pour des programmes de logements gouvernementaux.

Programme de recherche sur l'habitat économique parasismique en adobe - Pérou

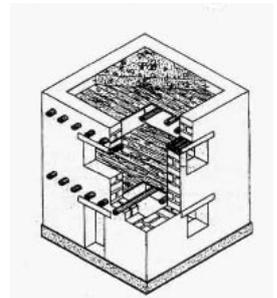
Ce programme a été développé en partenariat entre l'université San Antonio del Abad del Cusco (Pérou) et l'université de technologie de Delft (Pays-Bas) dans le but de trouver des solutions alternatives pour la réparation, le renforcement et l'amélioration des constructions en adobe existantes. Ces modifications devaient être faciles à mettre en oeuvre et affecter le moins possible la structure d'origine.

Plusieurs prototypes ont été testés sur plan incliné et table sismique. Ils ont par ailleurs fait l'objet de modélisation numériques qui ont permis de vérifier la validité des hypothèses de modélisation.

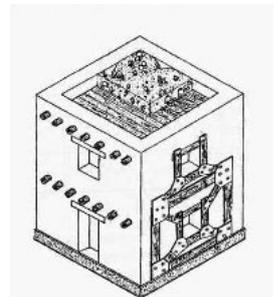


Les prototypes avaient tous la même base, à savoir un bâtiment de deux niveaux sur plan carré construit en adobe avec un plancher en bois et une toiture plate en bois recouverte de terre.

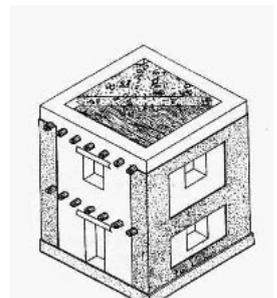
Type 1: des planches de bois fixées par des plaques en acier notamment sur le pourtour des ouvertures. Ce renforcement n'a apporté pratiquement aucune améliorations.



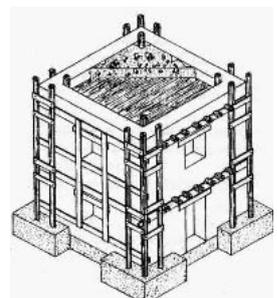
Type 2: des grillages sur les coins du bâtiment, au niveau du plancher et de la toiture. Cette solution a été très efficace, mais un renforcement supplémentaire au niveau des ouvertures semble nécessaire (fortes fissurations).



Type 3: une structure en bois renforçant les ouvertures et les coins du bâtiment. Cette solution a aussi très bien fonctionné mais semblait beaucoup trop complexe à mettre en oeuvre pour des applications pratiques.



L'ensemble du programme et ses résultats ont fait l'objet d'une publication: *Earthquake resistant construction of low cost adobe housing. Final Report* / A.W.M. Kok, G. Sovero / Delft: CICAT, 1996. Ce programme n'a malheureusement fait l'objet d'aucune application pratique.



II.3.3 Solutions expérimentales

Les deux projets suivants ont été conçus et construits en 1978 en partenariat entre:

- FEB-Kassel, Germany
- University Francisco Marroquin, Guatemala
- Centre of Appropriate Technology, Guatemala.

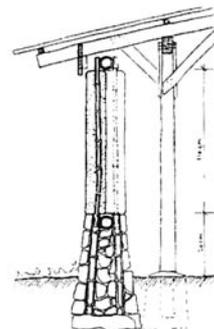
Construction en pisé parasismique



Elle est constituée d'éléments de 80 cm de large en pisé avec des renforts verticaux en bambou.

Les éléments sont autostables grâce à leur forme en T et indépendants, séparés par des joints rebouchés avec de la terre.

La toiture est indépendante des murs, fixée sur une structure en bois. Ceci permet d'éviter les problèmes dus aux mouvements de la toiture et des murs qui ont des inerties et des élasticités différentes.

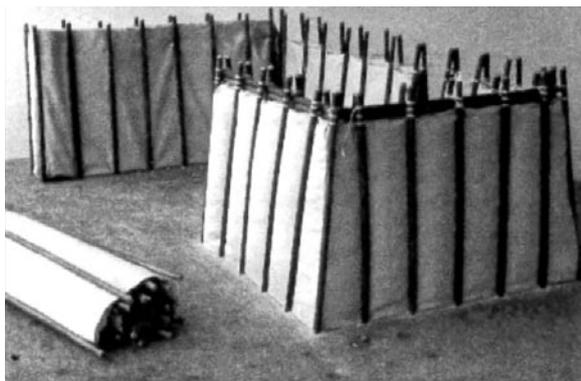


Murs textiles remplis de terre

Deux techniques ont été expérimentées, en utilisant du tissu en toile de jute rempli d'un mélange de terre et de pouzzolane. Les murs sont ensuite enduits à la chaux pour éviter le pourrissement.



Des boudins de tissus sont remplis puis empilés. Des renforcements verticaux en bambou sont plantés dans les murs et fixés à un chaînage en bois qui supporte la toiture.

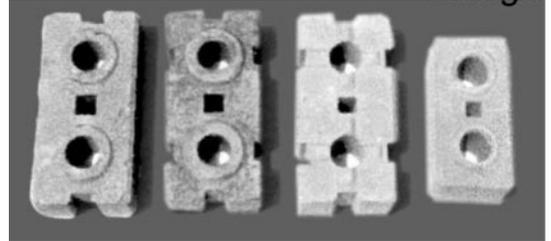


Les murs sont préfabriqués avec une structure en bois. Ils sont dépliés sur le chantier et remplis, le mur prenant alors un fruit important. Cette solution a l'avantage d'une très grande rapidité de montage.

Blocs de terre comprimé à emboîtement

Asian Institute of Technology, Bangkok - 1984

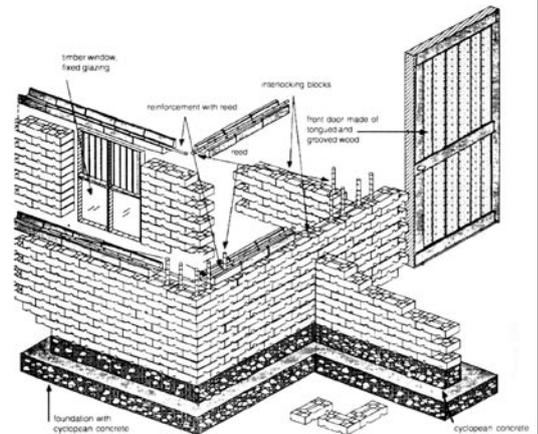
Les blocs de terre comprimée stabilisée comportent des encoches et des reliefs qui améliorent la résistance du mur aux secousses sismiques. Les trous permettent de monter facilement des renforcements verticaux efficaces.



Ce prototype utilise ce système avec des chaînages en béton armé et une toiture légère.

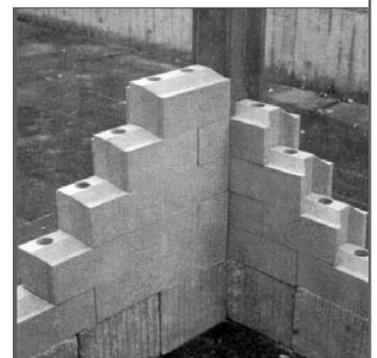
Univeridade de los Andes, Venezuela

Ce prototype reprend le même type de bloc, en proposant un système complet de construction, avec des blocs en U pour les chaînages médians et haut, et des ouvertures préfabriquées adaptées au module de maçonnerie.



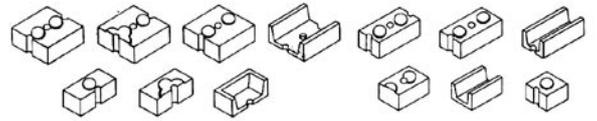
FEB - Kassel, Allemagne,

Remettant en cause la véritable efficacité des encoches et reliefs des blocs à emboîtement, la FEB a développé des blocs avec des encoches de 4 cm de profondeur. Ces blocs peuvent ainsi être montés sans mortier, ce qui augmenterait la flexibilité du mur et donc sa capacité à résister aux séismes.

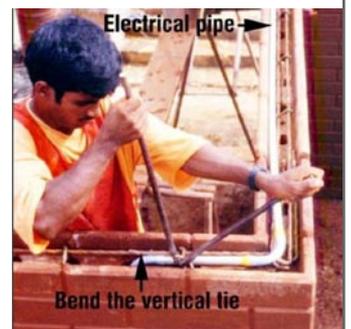
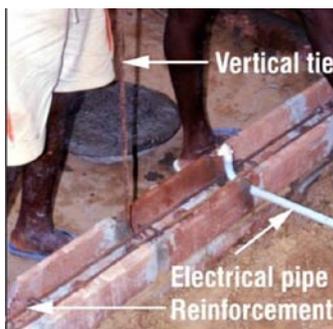


Habitat parasismique à faible coût, Inde - 2001

Ce prototype a été conçu et construit par le Earth Institute d'Auroville en Inde. Il utilise des blocs de terre comprimés autobloquants. Les presses à BTC permettent en effet de produire une large gamme de blocs autobloquants.



La construction à un niveau sur plan carré est renforcée par quatre chaînages en béton armé coulés dans des blocs en U, et des renforcements verticaux en fers à béton scellés au ciment dans les trous des blocs. La toiture légère est réalisée en bacs acier.



Le prototype a été monté à partir de tous ses éléments préfabriqués en 62 heures par une équipe de 20 personnes. La construction nécessite cependant une très grande qualification des maçons notamment pour assurer un calepinage et des joints corrects.

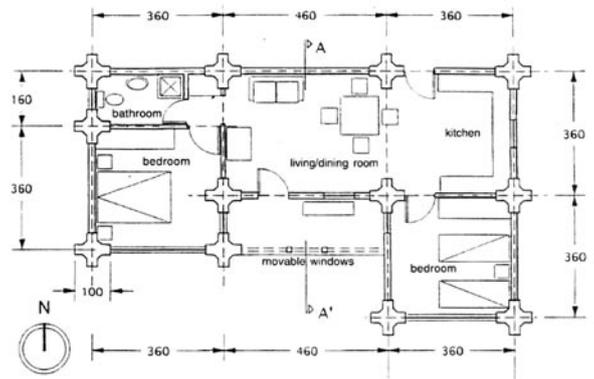


Améliorations de la technique du torchis

Le CEPED à Camari au Brésil a conçu un système de torchis préfabriqué. La structure souple et légère en bois résiste très bien au séisme. Le remplissage en terre apporte de l'amortissement lorsqu'il fissure, mais l'impact réel reste à étudier. Après un tremblement de terre, il suffit de refaire le remplissage. La préfabrication permet d'accélérer la mise en oeuvre et de mieux contrôler la qualité des assemblage, garants d'une bonne résistance de l'ensemble.



L'équipe de M. Kühn, Poblete et Trebilcock, à Santiago de Chile au Chili a conçu un système modulaire mixte. Le toit est supporté par des poteaux en pisé renforcés par des armatures verticales. Leur forme de croix leur confère un caractère autostable. Les murs et cloisons sont réalisés en torchis.



CRATerre-EAG (architecte Wilfredo Carazas Aedo) a conçu le projet de Joya de Ceren. Celui-ci utilise une technique découverte sur le site archéologique de Joya de Ceren au Salvador.

Une structure flexible en roseaux noués entre eux est remplie avec un mortier de terre. Des contreforts aux coins renforcent l'ensemble qui est couvert avec une toiture légère.



II.3.4 Solutions modernes éprouvées

Constructions du début du siècle en adobe, Wesmorland, Californie¹

Un exemple de construction en adobe bien conçue et entretenue, construite en 1935 et qui a subi sans dommages plusieurs tremblements de terre. Les murs sont renforcés par des chaînages haut et bas en béton armé.



Cette maison en adobe sans armature a été renforcée a posteriori par des chaînages en bois et des câbles tendus. Suite à un tremblement de terre elle n'a eu comme dégât qu'une fissure sur un pilier du porche.



Librairie municipale, Huancayo, Pérou

Ce bâtiment, qui fait office de centre communautaire et bibliothèque municipale a été conçu par CRATerre-AEG et construit en 1985.

Il est construit avec des briques de terre comprimée stabilisées avec 5% de ciment. Les renforcements horizontaux et verticaux sont en acier et le chaînage est en béton armé coulé dans des blocs en U. Des contreforts augmentent la résistance des coins.

Le campanile est une structure légère indépendante construite en bois.



1 - Earthen buildings in seismic areas. Proceedings of the international workshop held at the university of New Mexico, Albuquerque, may 24-28, 1981, National Science Foundation, Washington, 1981

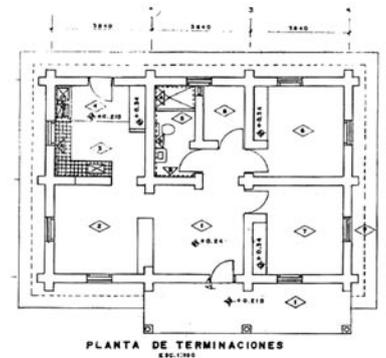
Maison La Calera, Santiago de Cuba, Cuba - 1997

Le projet pilote a été conçu par CRATerre-EAG et construit en 1997, en vue de développer la filière de construction en terre.

La maçonnerie est réalisée en adobes allégées. Des contreforts augmentent la stabilité des murs qui sont renforcés horizontalement et verticalement par des fers à béton. Le tout est couvert par une toiture légère.



Il est intéressant de noter que deux maisons ont ensuite été construites spontanément en reprenant le modèle du prototype à Manzanillo et Gramma, en milieu rural et urbain.



Projet de maison en adobe parasismique, Salvador - 2000

Ce projet conçu par CRATerre-EAG (Architecte Wilfredo Carazas Aedo) suite au tremblement de terre de 2000 au Salvador devait répondre à la demande en reconstruction à faible coût.

Le projet pilote est une maison en adobe allégée avec de la paille, renforcée par des armatures horizontales et verticales en roseaux. Des contreforts sont placés aux quatre coins.

La maçonnerie a la même hauteur sur tous les murs, la hauteur supplémentaire nécessaire à la pente de la toiture légère étant faite en bois.

Plusieurs maisons ont ensuite été construites sur le même modèle, avec quelques variations, par les partenaires locaux et des particuliers.



Centre social de l'UCA, Salvador - 1995

Le centre social de l'Universidade Simeon Canas a été construit en 1995 par CRATerre-EAG (Architecte Wilfredo Carazas Aedo).

Le rez-de-chaussée d'une hauteur est construit en adobe avec des renforcements horizontaux et verticaux et des contreforts. L'étage, de hauteur variable est construit en torchis avec des panneaux de bois préfabriqués souples remplis de terre. Le plancher de l'étage est une dalle en béton armé, une autre solution n'ayant pu être possible tout en respectant les normes en vigueur.



Le bâtiment a subi le tremblement de terre de 2000 ($M_s=7$) sans aucun dommages à part une fissure entre la dalle en béton et le mur en adobe.

Les autorités ont malheureusement préféré le détruire.



II.4 Conclusions

Comme grandes lignes directrices pour la conception de mon projet, dans le cadre de la problématique décrite dans le premier chapitre, je retiendrais les points suivants, qui reposent à la fois sur des choix personnels et des nécessités. Il serait présomptueux et surtout impossible de tenter de cerner ce qui définit l'identité architecturale de Bam (ou ses identités). Par contre j'ai retenu certains aspects des cultures constructives, qui me semblent indissociables de l'architecture Bami et transposables de manière intéressante et judicieuse dans le contexte actuel.

Le *khest* (brique de terre crue) était le matériau de prédilection pour les constructions, des plus modestes aux plus prestigieuses. Sa facilité de production et de mise en oeuvre et les possibilités infinies qu'il offre en font le matériau indispensable pour envisager la reconstruction de Bam dans la continuité de son histoire.

Le *chiney* (terre empilée ou bauge) ne jouit pas du même prestige, réservé aux clôtures et remparts, et dans d'autres régions d'Iran aux habitations les plus modestes. Le tremblement de terre lui a redonné un peu d'attention, sa résistance au séisme étant impressionnante et inattendue. Des murs de plus de 4 m de haut et 50 m de long ont ainsi parfaitement résisté, sans renforcement ni contrefort. Malgré sa mauvaise image, ce matériau mérite d'être étudié et utilisé.

Les arcs, voûtes et coupoles sont indissociables de la culture iranienne. L'observation montre leur comportement parfois très bon face au séisme, et la reconstruction de Bam pourrait être l'opportunité d'enfin étudier de manière approfondie le comportement de ces structures afin d'envisager de construire de nouveau ce qui a fait la fierté de l'architecture iranienne. Elles permettent en outre de se passer de matériaux complémentaires pour les toitures.

La définition et la séparation des espaces privés et publics est présente dans l'architecture de Bam, depuis les constructions les plus modestes jusqu'à la mosquée la plus grandiose. Ces espaces s'articulent autour de cours et jardins, représentations du paradis et sources de fraîcheur, par la maîtrise de l'air et de l'eau dont ont fait preuve les constructeurs iraniens.

Cependant, la culture constructive de Bam n'est pas parasismique. L'observation d'autres cultures parasismiques utilisant la terre ou la maçonnerie, et l'étude des différents programmes de recherches ou projets récents permet de s'orienter pour améliorer les techniques locales. On peut faire les quelques conclusions suivantes:

Il existe des solutions pour construire des murs en terre parasismiques très efficaces, elles sont connues et décrites abondamment et ont été validées par de nombreux tests et parfois des séismes. Parmi celles-ci l'adobe a une très bonne place. Les contreforts, chaînage haut, renforcements horizontaux et verticaux sont des solutions simples et dont l'efficacité n'est plus à démontrer. D'autres solutions existent, et l'on peut constater que de manière générale, plus elles sont complexes et nouvelles, moins elles ont d'applications pratiques en dehors des laboratoires.

Les programmes de recherches passés étaient de trois types:

- explication et quantification de comportements structurels observés, notamment dans le domaine du patrimoine,
- validation de solutions classiques en vue de leur application ou normalisation,
- développement de nouvelles techniques.

Cependant, les arcs, voûtes et coupoles n'ont jamais été étudiées, et on peut envisager les trois mêmes types de programme de recherche pour ce type de couverture. Il manque aussi de manière générale de travaux sur les structures de protection des personnes, dites «collapse-proof».



A l'aide de tous ces éléments, il est possible d'avoir une démarche de projet s'inscrivant de manière globale dans les trois aspects de la problématique, à savoir la composante technique, la composante culturelle et la composante socio-économique.

Il s'agit en effet de concevoir un projet pour la base-vie de l'ICHTO à Bam, mais aussi par ce biais de proposer un panel de solutions techniques et architecturales adaptées au contexte. Elles devront donc être utilisables pour la construction de logements ou d'équipements en ville, en intégrant les questions de coût, de création de richesses locales et d'appropriation par les habitants .

Après une définition des principes constructifs et architecturaux retenus, découlant des cultures constructives de Bam ainsi que des expériences de constructions parasismiques en terre de par le monde, le programme sera clairement défini, s'intégrant dans les perspectives à court, moyen et long terme de la Déclaration de Bam.

III.1 Les composantes du projet.....	97
III.1.1 Composante technique.....	98
III.1.2 Composante culturelle.....	99
III.1.3 Composante socio-économique.....	99
III.2 Principes constructifs retenus.....	100
III.2.1 Matériaux.....	100
III.2.2 Systèmes structurels.....	102
III.2.3 Synthèse des différentes solutions: les modules de base.....	125
III.2.4 Pistes de recherche.....	126
III.3 Programme.....	129
III.3.1 Les bureaux avant le tremblement de terre.....	129
III.3.2 Les perspectives de développement du centre de Bam.....	129
III.3.3 Programme à court terme détaillé.....	132
III.4 Aperçu du projet architectural.....	133
III.4.1 Présentation du site.....	133
III.4.2 Organisation spatiale.....	135
III.4.3 Perspectives d'évolution.....	136
III.4.4 Premières esquisses.....	137

III.1 Les composantes du projet

La problématique de ce travail, à savoir la place que peut avoir la construction en terre dans le processus de reconstruction de Bam, a été divisée en trois composantes, technique, culturelle et socio-économique. Le projet que je propose pour la construction de la base vie de l'ICHTO à Bam doit répondre aux trois aspects de cette problématique pour être viable.

Les différentes solutions présentées ci-après pour la réalisation de ce projet ont pour ambition de ne pas se limiter uniquement au projet de base-vie lui-même, mais de s'inscrire dans le plus large processus de reconstruction. Celui-ci concerne donc non seulement des infrastructures publiques, mais aussi des bâtiments à caractère privé comme des bureaux et surtout des logements.

Ces différents types de construction, suivant leur usage, leur relation à la citadelle (géographique ou symbolique) et à l'impressionnant héritage culturel de la ville, les populations qu'ils visent, ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. Il est nécessaire de pouvoir classer mes propositions en fonction des critères de la problématique pour pouvoir juger de leur adaptabilité à un autre contexte que celui du projet lui-même.

Ce n'est que par cette approche globale que la reconstruction de Bam peut prendre un sens, et que la construction en terre peut y participer.

L'ensemble du projet est prévu sous formes de modules interchangeables, chacun de ces modules répondant différemment aux trois critères détaillés ci-dessous.

III.1.1 Composante technique

Bam est située en zone à haut risque sismique et en a fait tristement l'expérience, d'autant plus que ce risque n'était pas du tout appréhendé par les populations et les autorités. Il est donc aujourd'hui impensable de construire à Bam sans prendre en compte ce risque, du moins en théorie, les faits ayant malheureusement déjà montré le contraire pour les premières reconstructions d'urgence. Les normes iraniennes de construction sont là pour assurer le caractère parasismique de tout bâtiment, même si leur application pratique et le contrôle de leur respect est difficile à mettre en place à une si grande échelle.

Comme toutes les normes parasismiques, elles incluent dans leurs formules de dimensionnement un coefficient nommé «coefficient d'importance du bâtiment» qui est plus élevé pour les bâtiments dont l'effondrement est jugé plus dommageable que les autres, notamment en vies humaines. Ainsi les constructions «très importantes» comme les hôpitaux ou les écoles ont un coefficient de 1,2 les «importants» comme les habitations de 1 et les «peu importants» comme les bâtiments temporaires ou peu utilisés de 0,8.

L'utilisation de ce coefficient est somme toute assez sensée, même si l'on pourrait se dire a priori que toutes les constructions devraient offrir un degré de protection maximal. Comme nous l'avons vu en I.1, les normes sont fondées sur des considérations statistiques, et elles prennent en compte le fait que l'augmentation de la résistance d'un bâtiment entraîne obligatoirement une augmentation de son coût, et que cette augmentation de coût doit donc être justifiée. Les différentes solutions techniques proposées dans ce projet doivent de même être classées en fonction de leur résistance (supposée ou prévue uniquement, malheureusement) pour pouvoir juger de leur adéquation aux différentes utilisations possibles.

Cependant, il serait catastrophique de ne se limiter qu'à la résistance sismique pour évaluer les solutions d'un point de vue technique. Il s'agit ici de bâtiments où l'on doit vivre, travailler, dormir... Parmi les critères techniques à retenir, il faut donc inclure tous les éléments de confort physique comme le comportement thermique, acoustique et l'éclairage. Le critère écologique est aussi primordial, surtout à une aussi vaste échelle. Les conséquences de la reconstruction sur l'environnement de Bam ne sont pas à négliger. La terre comme matériau de construction est dite «moyenne dans tous les domaines, mais mauvaise dans aucun». C'est pour cela qu'elle peut être intéressante, même sans prendre en compte les composantes culturelle et socio-économique. Alors que si on la considère uniquement du point de vue de la résistance, elle est nettement moins performante (à qualité de réalisation égale) que d'autres matériaux.

Une tente, la plupart des constructions d'urgence ou même les nouveaux bureaux du gouverneur ci-contre illustrent facilement ce propos. Ces structures très légères sont parfaitement résistantes au séismes, mais sont invivables en été à Bam, à moins d'utiliser une climatisation.



III.1.2 Composante culturelle

Bam est donc divisée officiellement en une zone tampon, autour de la citadelle et de ses sites associés, et le reste de la ville. Les constructions dans la zone tampon doivent recevoir l'agrément de l'ICHTO, l'organisation nationale du patrimoine. Celle-ci doit en effet veiller que la reconstruction ne dénature pas trop la proximité des monuments classés au Patrimoine Mondial. Par ailleurs, tout le monde reconnaît officiellement l'importance de préserver l'identité de la ville, au travers notamment de la Déclaration de Bam. La mise en pratique de ces bonnes intentions est cependant beaucoup plus difficile.

Définir cette identité de Bam n'est pas aisé, mais il est évident que l'ensemble de ses constructions et le rapport qu'elles ont les unes aux autres, avec l'espace public et avec leur environnement y participent. Si l'on parle de continuité, les constructions en terre font évidemment partie de l'histoire de Bam. Cependant Bam a bien sûr changé, ses habitants et leurs modes de vie aussi. S'enfermer dans une approche passéiste en voulant recopier le passé est voué à l'échec. Il s'agit en effet de continuité, pas d'arrêt dans un état.

On doit donc ici considérer le matériau de construction, mais aussi les espaces qu'il crée et leurs usages. On a pu identifier certains aspects de l'architecture passée de Bam, les différentes solutions proposées pourront être mises en relation avec ces éléments, de manière plus ou moins évidente.

III.1.3 Composante socio-économique

Bam est une ville détruite, matériellement bien sûr, mais aussi économiquement et socialement. Au lendemain du tremblement de terre, les adultes étaient sans emplois, les enfants n'avaient plus d'école et les étudiants plus d'université. Même si d'après la formule galvaudée, «la vie a repris le dessus», il reste encore énormément à faire.

Le secteur de la construction est l'un des moteurs de l'économie d'une société, et encore plus particulièrement dans ce contexte de reconstruction à grande échelle. La reconstruction des bâtiments génère des emplois, mais recrée aussi la vie sociale, au niveau du voisinage immédiat, du quartier et de la ville entière. Une fois le besoin primordial d'avoir un toit résolu, la vie peut reprendre.

Cependant, un logement, c'est aussi une «seconde peau», c'est le lieu de la vie de famille, ce peut être une source d'identification, de fierté, et ces aspects sont nécessaires au sentiment d'appartenance à une société.

Mais c'est aussi un investissement à très long terme. En ce sens, un logement peut représenter une part très importante des dépenses d'un foyer, et ces dépenses peuvent être ou non génératrices de richesse en créant du patrimoine. Il ne faut pas oublier que l'IHF ne finance la reconstruction qu'à hauteur de 4500\$ sous forme de don, et 3500\$ sous forme de prêt, ce qui est souvent insuffisant pour les besoins des familles qui sont obligées d'emprunter plus. Au niveau des infrastructures publiques, il en va de même, le coût de la construction d'un bâtiment ne représentant souvent que 10% du coût total de celui-ci durant son cycle de vie, qui nécessitera entretien, rénovations, chauffage, climatisation, éclairage...

Dans cette ville où presque tout est à refaire, et à grande échelle, tous ces éléments sont d'une importance capitale. Les différentes solutions proposées par la suite répondent plus ou moins bien à ces problèmes en fonction de leur coût, de l'utilisation plus ou moins importante de ressources locales, du nombre d'emplois générés et de leurs niveaux de qualification, de leur facilité d'assimilation et d'appropriation par les populations, du coût et de la difficulté de leur entretien...

III.2 Principes constructifs retenus

III.2.1 Matériaux

L'adobe

Composition de la terre

Les tests de terrain et de laboratoire effectués à Bam ont montré la convenance des terres disponibles pour la production d'adobes. Des essais plus poussés réalisés à l'aide de presses qui ont déjà commencé permettront éventuellement d'affiner le choix des terres. Cependant, étant donné le contexte urbain et la nécessité pour l'ICHTO d'avoir un site de production d'adobes, le choix final de la carrière utilisée risque de dépendre principalement de critères économiques et de disponibilité.

Dimension des adobes

En contexte sismique, l'utilisation d'adobes carrées les plus grandes possibles est recommandée. Etant données les difficultés de production actuelles, nous nous limiterons à des adobes de 30 cm de côté et 10 cm de hauteur. En outre de plus grandes adobes commencent à être difficiles à manier.

Pour les voûtes, la taille des adobes sera réduite à 20cm de côté pour 8 cm d'épaisseur, ceci afin de limiter le poids de la toiture et de faciliter le montage.

Mortier

Les joints de mortier seront de 2 cm. Le mortier sera stabilisé au ciment, ce qui est préconisé dans de nombreuses références. Ceci permet d'améliorer l'adhérence du mortier aux adobes, et protège de la corrosion les renforcements en aciers éventuellement utilisés.

Fibres

Les adobes pourront être renforcées avec des fibres végétales. Ceci en effet permet de limiter la fissuration, d'augmenter la résistance à la traction des adobes tout en limitant leur poids, et d'accélérer leur séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres.

La paille utilisée jusqu'à présent attirant fortement les termites, elle ne doit plus être utilisée.

Les fibres de dattiers semblent pouvoir avantageusement les remplacer. Leur utilisation traditionnelle dans certaine régions d'Iran est décrite par Hosseini Zomorchi (*Iranian Architecture, building with traditional material*, 1995).

Celles-ci sont en effet disponibles en grande quantité, provenant de la coupe des branches basses des dattiers une fois par an. Les branches sont écrasées pour séparer les fibres. Imputrescibles, elles sont encore utilisées aujourd'hui pour fabriquer des cordes. Les dattiers semblent relativement préservés des infestations de termites, même si le rapport de l'UNEP (United Nation Environment Program) les signale comme étant attaqués en Iran¹. On ne voit en effet de troncs attaqués qu'exceptionnellement, et les Bami connaissent la résistance des dattiers aux termites, mais de véritables statistiques et études sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Le risque d'apparition de nouvelles espèces de termites s'attaquant aux dattiers n'est pas à négliger.



Les premiers essais effectués sont prometteurs, avec une importante diminution du retrait (qui passe de 4,8% à 1,5%) et une certaine facilité de mélange. Des tests de compression et de cisaillement permettront de déterminer la quantité optimale de fibres, et éventuellement la réduction de poids engendrée.

Par précaution, suivant les préconisations de l'UNEP, ces adobes ne devront pas être placées à moins de 30 cm du sol.

Le chiney

La bauge à Bam et son utilisation ayant été beaucoup moins étudiées et documentées, il est difficile d'aborder son emploi dans le détail. La terre utilisée pour le chiney diffère peu de celle des adobes mais contient en général plus de cailloux. Elle n'est jamais combinée avec des fibres. Il serait cependant intéressant d'en étudier l'influence, en utilisant les mêmes fibres que pour les adobes. En effet, le chiney souffre d'un problème de fissuration important au séchage.

Les matériaux dits standards

J'utiliserai dans mon projet différents matériaux comme renforcements, à savoir les fers à béton, les grillages métalliques et plastiques et le béton armé.

L'utilisation de bois pour les renforcements et chaînages peut sembler à première vue plus logique dans le contexte de Bam, où la composante historique a un poids important. C'est en effet un matériau qui peut avoir une image historique ou traditionnelle, et qui a été utilisé en Turquie par exemple pour rendre des maisons parasismiques. Certains employés de l'ICHTO m'avaient d'ailleurs fait la remarque que l'utilisation d'acier ou de béton armé n'était pas envisageable pour leurs bureaux. Cependant, l'utilisation d'éléments structurels en bois ne fait pas vraiment partie de la culture constructive traditionnelle de Bam à quelques exceptions près. On n'a retrouvé d'exemples d'utilisation de poutres en troncs de dattiers que dans quelques murs du château.

Par contre, son utilisation pose des problèmes sur les points suivants:

- La présence de termites sur le site rend certainement impossible l'utilisation de bois sans traitements chimiques. Ceux-ci, outre inverser le bilan écologique de l'utilisation du bois, ont un coût élevé, une efficacité toute relative et un impact sanitaire très négatif¹. Tant que la présence des termites à Bam n'aura pas été convenablement étudiée pour déterminer les risques réels qu'elle engendre et éventuellement les essences de bois résistantes, l'utilisation de bois comme élément structurel est à proscrire.

- L'inexistence d'une filière bois pour la construction rend difficile son utilisation comme élément structurel. La main d'oeuvre qualifiée peut en effet être considérée comme trop peu nombreuse.

- Pour la même raison, le bois reste plus cher que des éléments standards en acier ou béton armé.

Tous les éléments ne pouvant être construits facilement en terre (comme les fondations et les dalles) seront réalisés selon des techniques standard largement rependues dans le secteur de la construction à Bam. Ceci permettra de faciliter autant que possible la réalisation de bâtiments en terre, en limitant la quantité de nouvelles techniques et donc de formations nécessaires. Cela permettra par ailleurs de réduire les coûts. On pourrait cependant envisager à terme de construire certains éléments en brique cuite, notamment les soubassements.

III.2.2 Systèmes structurels

Les différentes solutions techniques que je développe ici ont été abordées selon plusieurs angles et peuvent être classées en trois catégories.

- les murs reprennent des techniques relativement connues et éprouvées. Leur comportement et leur réponse aux contraintes sismiques a été largement étudiée. Leur description est aussi complète que possible.

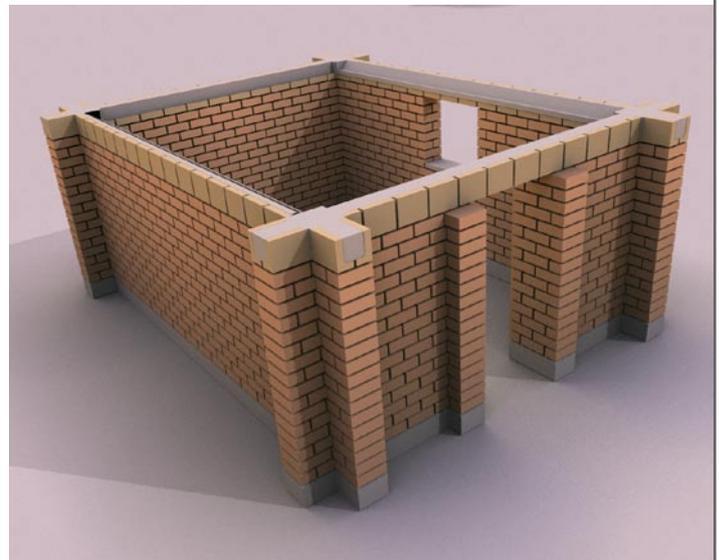
- les couvertures de faible portée ainsi que les arcs sont abordés de manière plus théorique. En effet, leur conception repose plus sur des hypothèses de comportement qui sont décrites et dont j'essaie de cerner les limites. Leur taille modeste permet cependant d'envisager leur construction en s'appuyant sur l'observation de structures existantes.

- les couvertures de plus grande portée, principalement les coupoles, ne sont décrites que comme des pistes de recherche éventuelles. Ces techniques ne peuvent être envisagées sans être validées par des programmes de recherche et des essais.

Murs - prototype 1

Ce prototype est conçu pour être le plus simple possible, dans une optique de limitation des coûts mais surtout d'appropriation facilitée.

Il reprend les éléments les plus classiques de construction en terre parasismique, à savoir des murs de faible dimension et d'élançement limité, des renforcements verticaux et horizontaux, des contreforts et un chaînage haut. Le choix des matériaux de renforcement s'est orienté vers des matériaux standard de l'industrie du bâtiment pour faciliter leur utilisation.



Fondations

Le prototype est monté sur des fondations en semelles filantes en béton armé. Le dallage en béton armé assure la solidarisation des fondations et joue le rôle de diaphragme. Un soubassement de 22 cm de hauteur (deux adobes plus un joint) en béton armé joue le rôle de chaînage bas et protège les murs des remontées d'humidité. Les renforcements verticaux sont ancrés dans le soubassement.

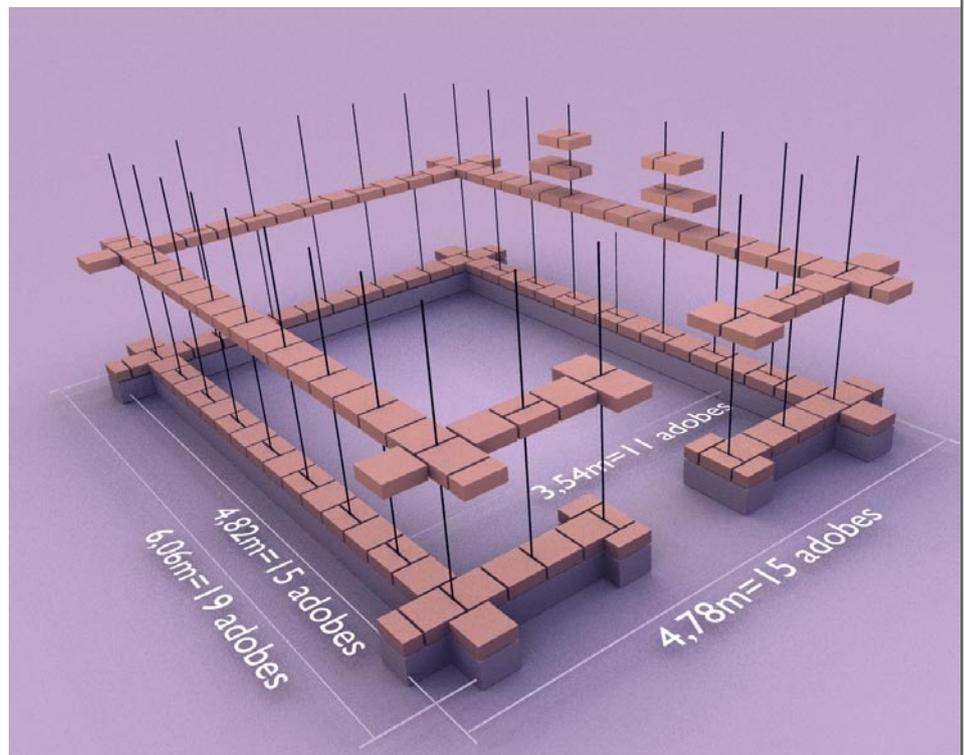
Si l'on se réfère aux normes parasismiques algériennes, la présence du soubassement en béton armé (le ferrailage minimal étant 4 barre T12 maintenues par des cadres T8 dont l'espacement ne dépasse pas la hauteur du soubassement) permet de se contenter de fondations en béton de tout-venant (200kg de ciment par m³). Ce point mérite d'être étudié, notamment après une observation précise du type de sol, afin de voir si il est judicieux de réaliser des fondations en béton armé, ce qui augmenterait de manière importante le coût de construction.

Le soubassement en béton permet par ailleurs, n'étant pas enduit, de faciliter la détection visuelle de galeries de termites. Il devra être réalisé avec soin pour éviter autant que possibles les fissures qui leur permettraient de passer sans être visibles¹.

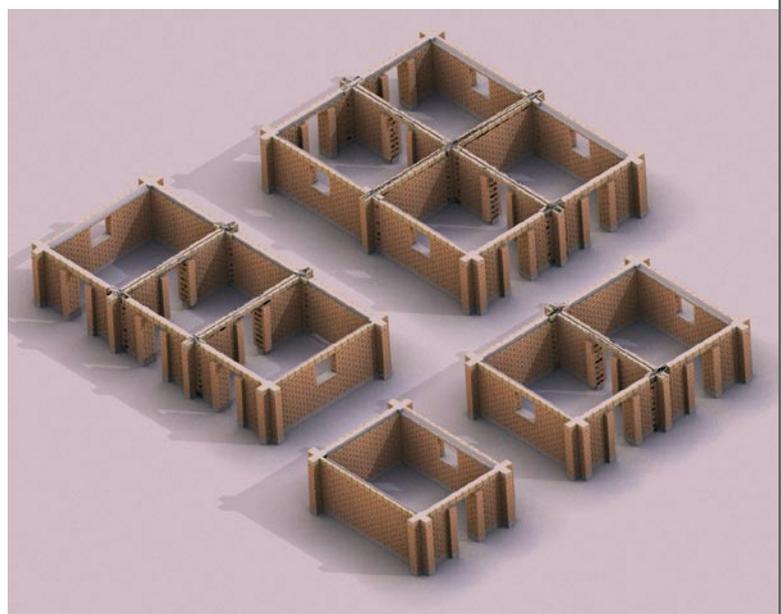
Appareillage:

Celui-ci est très simple, n'utilisant que des adobes entières et des demi-adobes. Les deux lits différents sont montrés ci-dessous, avec les différentes possibilités pour les ouvertures.

Les ouvertures sont placées entre renforcements verticaux, le plus loin possible des extrémités des murs, ce qui laisse deux emplacements possibles dans chaque mur long et un seul dans les murs courts. Il n'est possible de mettre qu'une ouverture par mur. Le chaînage fait office de linteau. Les fenêtres peuvent soit avoir une allège pleine qui s'arrête au niveau d'un renforcement horizontal, soit être réalisées comme une porte, avec une allège remplie de matériau léger par la suite. Cette dernière solution est en général décrite comme étant la plus efficace et c'est celle que je retiendrai. Les ouvertures sont par ailleurs renforcées par des contreforts. Les ouvertures peuvent être coffrées avec les menuiseries métalliques si elles s'y prêtent. Sinon, étant donné le nombre de modules à construire, la fabrication de coffrages métalliques semble justifiée par rapport à des coffrages en briques non-maçonnées.



Il est possible de combiner jusqu'à quatre modules pour obtenir des ensembles de plus grande dimension. Au delà, il vaut mieux combiner plusieurs modules séparés par des joints pour éviter soit des murs trop grands, soit un rapport longueur/largeur trop élevé. Les ouvertures ne sont données ici qu'à titre indicatif.



Renforcements verticaux

Ils sont fait à l'aide de fer à béton. La détermination du diamètre nécessaire est empirique et peut se fonder sur les quelques points suivant:

- les joints étant de 2 cm d'épaisseur, il est préférable d'utiliser des fers inférieur à 12 mm de diamètre pour favoriser leur enrobage. En cas de diamètre supérieur, l'utilisation d'adobes avec des réservations semi-circulaires sera nécessaire.

- de nombreuses études et recommandations sur la construction en adobe parasismique, notamment au Pérou, préconisent l'utilisation de tiges de bambou ou de cane. La résistance à la traction des fers à béton est indubitablement suffisante en partant de ce point. Cependant, l'influence de la résistance à la torsion des renforts verticaux n'est pas déterminée. Celle des fers à béton étant faible, certains préconisent plutôt l'emploi de tubes en acier ou de cornières (il a été montré en tout cas que des fers à béton uniquement au quatre coins avec un chaînage haut n'apportent aucune amélioration ¹). Pour des raisons de coût et de disponibilité des matériaux, le prototype est présenté avec des fers à béton dont l'efficacité est assurée par l'utilisation conjointe de renforts horizontaux.

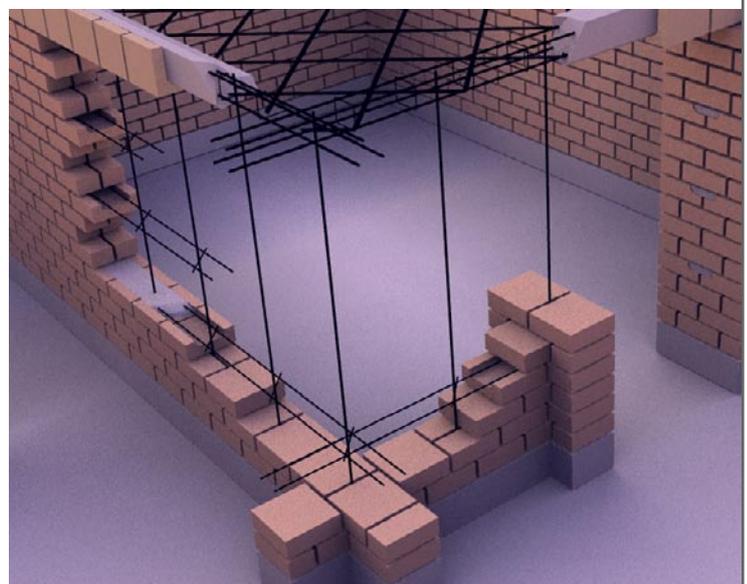
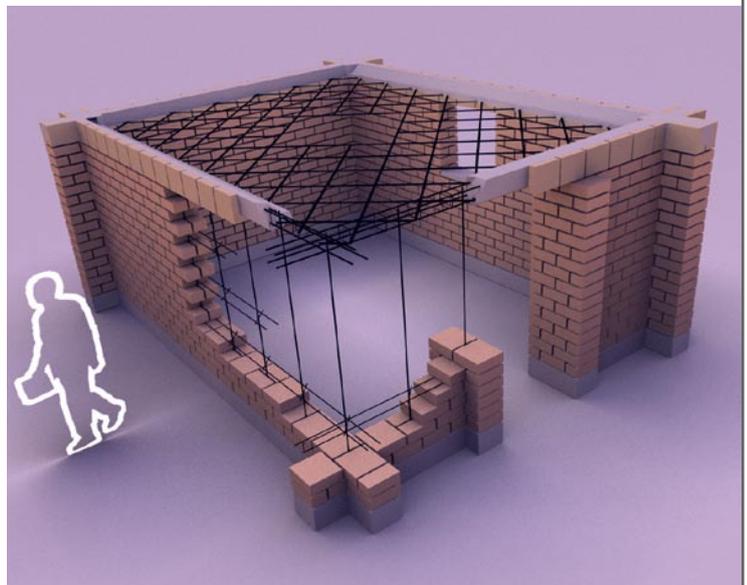
Renforcements horizontaux

Les renforcements horizontaux permettent d'augmenter de manière importante la ductilité des maçonneries. Parmi les renforcements utilisés ou décrits, on trouve les treillis de fil soudés, les fers à béton, les filets métalliques soudés et les filets plastique. Nous ne retiendrons que les trois derniers, toujours pour des raisons de coût, sachant que la mise en oeuvre du premier est tout à fait semblable.

Ils sont disposés toute les quatre rangées d'adobe, et doivent être fixés aux armatures verticales et correctement noyés dans le mortier.

Les fer à béton sont les plus facile à trouver et leur utilisation est connue des maçons. Ils doivent être le plus fin possible pour permettre un bon enrobage par le mortier. Utilisés par paire, ils doivent être ligaturés avec les armatures verticales. Leur mise en oeuvre peut cependant poser des problèmes si ils sont légèrement cintrés, leur enrobage étant alors très difficile.

On peut opter pour l'utilisation d'adobes spéciales en U pour les lits renforcés pour avoir de la marge pour placer les fers à béton.

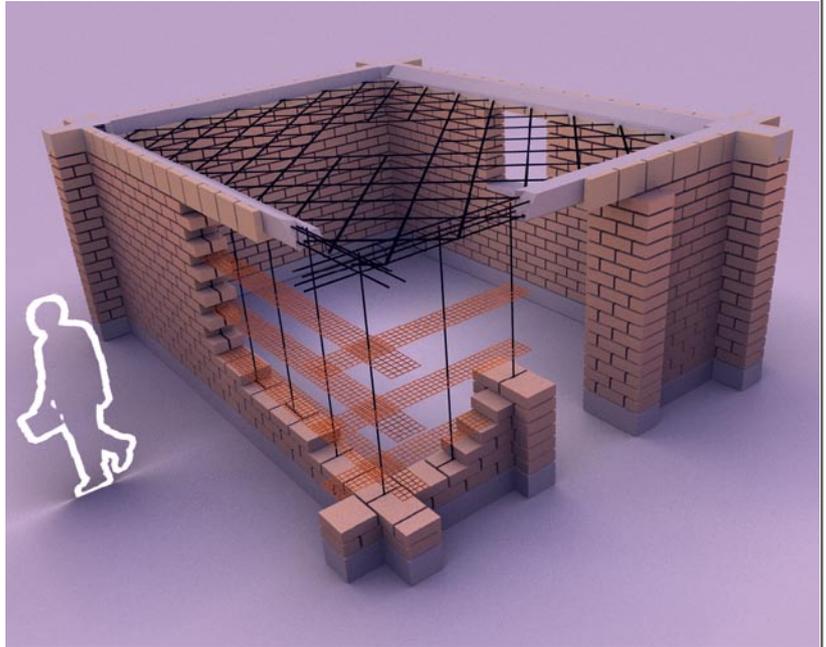


Les filets métallique soudés sont obligatoirement galvanisés. Ils sont ligaturés aux armatures verticales, même si celles-ci passent au travers. Les mailles doivent être les plus petites possibles mais suffisamment larges pour permettre un bon accrochage du mortier.

L'utilisation de filets plastique est semblable à celle des filets métalliques. La PUCP (Université Catholique du Pérou) a réalisé des essais avec onze types différents de filets de polyéthylène haute densité. L'élongation de la plupart était de l'ordre de 100 %, ce qui est excessif. Leur choix doit donc être fait après essais. A titre indicatif, la résistance moyenne qu'ils ont obtenu par unité de largeur dans le sens longitudinal est de 2,4kN/m avec une élasticité de 37 kN/m, et dans le sens transversal respectivement 2,5 kN/m et 26 kN

m¹. Malgré ces caractéristiques qui peuvent sembler faibles, les essais sur table sismique d'une structure renforcée par un filet plastique tous les quatre rangs d'adobes ont montré un très bon comportement proche de celui d'une structure renforcée avec de la cane et même meilleur dans le domaine post-élastique.

Il est impossible aujourd'hui de dire lequel de ces matériaux convient le mieux pour les renforcements, aucun essai comparatif n'ayant été fait. On sait cependant que correctement mis en oeuvre, ils permettent d'améliorer de manière significative le comportement des maçonneries en terre crue. Le choix devra donc se faire sur des critères de disponibilité, de coût, de facilité de mise en oeuvre et d'acceptabilité par les artisans et les habitants.



Chaînage et diaphragme

Le chaînage est fait en béton armé de quatre barres de 12 mm de diamètre. Il est fixé aux armatures verticales. La version la plus simple est coulée dans des briques en U. Etant donné les dimensions du chaînage (selon l'eurocode 8 leur section transversale doit être d'au moins 15x15cm et les normes algériennes préconisent une hauteur de 20cm), ces briques en U sont assez fines. Elles sont stabilisées au ciment car soumises à de fortes contraintes. Le chaînage lui-même fait ici 18x18 cm de section.

Le chaînage doit être rigide dans les deux directions, horizontale pour reprendre la poussée de la voûte ou coupole, et verticale pour limiter le déplacement différentiel de l'appui de la voûte. Cependant, Fred Webster affirme que le chaînage devrait être flexible verticalement, avec une armature uniquement en son milieu, suite à des «essais sur table sismique» dont il ne donne malheureusement pas les références¹.

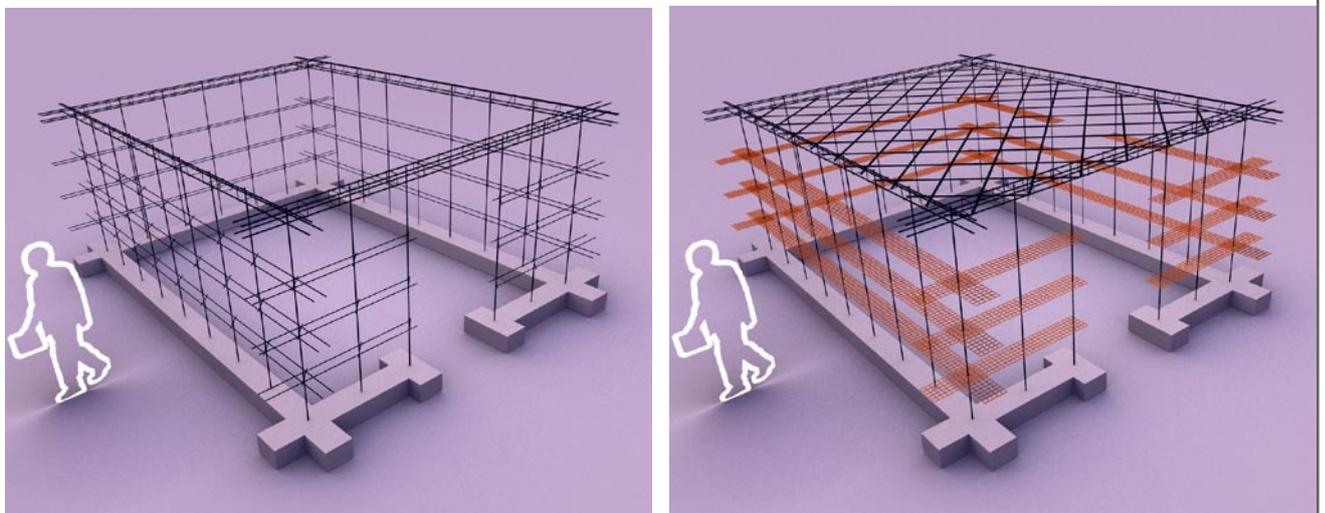
Pour améliorer et faciliter le montage des voûtes ou coupoles, le chaînage peut être coffré avec l'angle de départ de voûtes comme sur les représentations. Sa réalisation pratique risque cependant de présenter certaines difficultés, et cela réduit la section du chaînage.

Pour augmenter la rigidité de l'ensemble, un treillis soudé standard est fixé aux armatures du chaînage avant qu'il ne soit coulé. Ce treillis permet de trianguler le chaînage mais en répartissant les efforts tout le long de celui-ci et non aux seuls coins comme des tirants. Son coût est relativement faible, malgré les chutes importantes dues à la coupe en diagonale. Une ouverture la plus petite possible est découpée en son milieu pour permettre le passage d'une personne pour l'entretien. En outre, cette grille peut jouer un rôle de protection en cas d'effondrement de la toiture, soit par un dimensionnement des mailles inférieur à la taille des adobes, soit en combinaison avec un filet plus serré.

On peut envisager un autre montage du treillis soudé en prenant quatre morceaux triangulaires découpés dans un carré et fixés aux quatre coins. Ceci évite d'avoir des chutes et laisse plus de place pour accéder à la voûte tout en facilitant le montage grâce à la plus petite taille des éléments. Cependant, le renforcement semble moins important et des tests permettraient de voir si ils sont suffisants.

L'efficacité de cette proposition reste à démontrer mais je pense qu'elle ne peut qu'apporter des améliorations d'un point de vue structurel, tout en gardant perceptible le volume de la voûte ou de la coupole qui est placé au dessus. Par contre sa mise en oeuvre risque d'être difficile. Il faut en effet assurer la bonne liaison avec le chaînage et le coffrage est probablement complexe.

Les différents renforcements sont montrés dans les deux illustrations ci-dessous sans la maçonnerie et sans le treillis pour les renforcements en fer à béton, pour plus de lisibilité :



Filets extérieurs

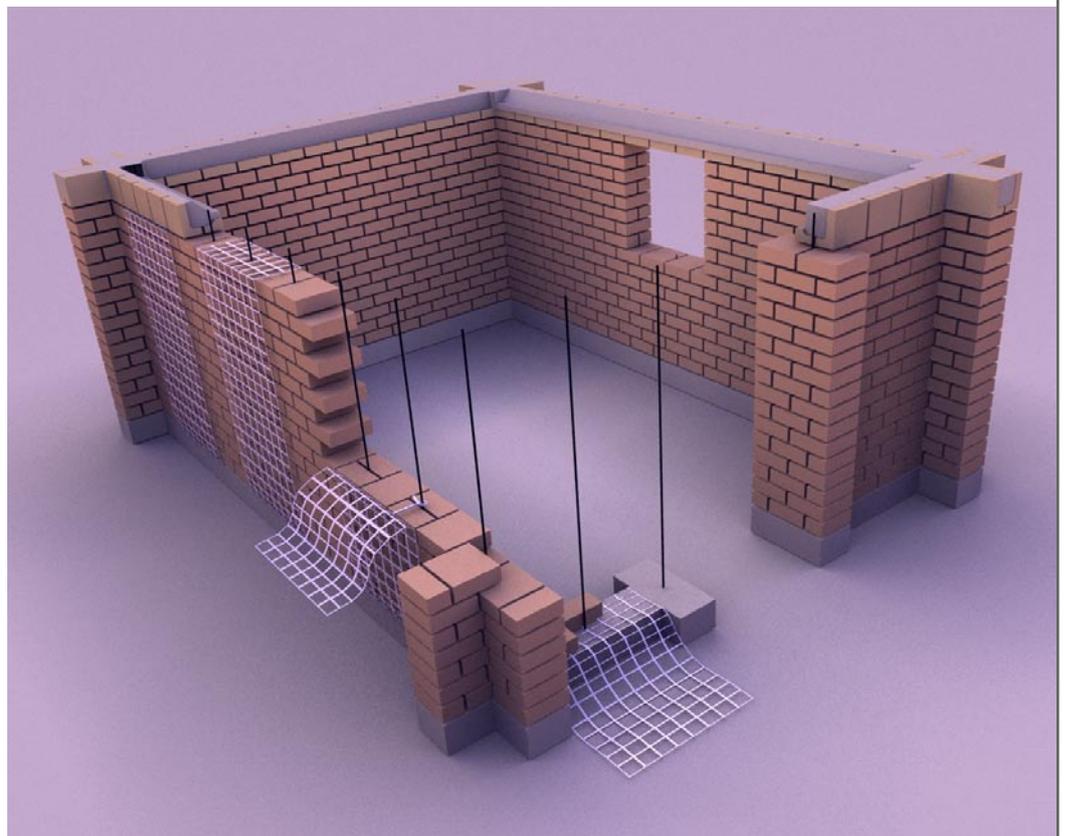
Cette technique a notamment été étudiée par la PUCP pour l'amélioration des constructions existant, en clouant des bandes de grillage métallique galvanisé de chaque côté des murs, noyé dans un enduit au ciment. L'efficacité de la méthode les a ensuite poussé à tester cela sur les constructions neuves et en remplaçant le grillage par du geotextile fixé au mur par des liens en plastique dans les joints¹.

Le grillage métallique est la meilleure solution, même si le geotextile reste intéressant pour un coût inférieur (avec notamment une excellente réponse cyclique après la formation des fissures). Le grillage diminue le risque de d'effondrement du mur hors de son plan, alors que l'enduit au ciment renforce la résistance au cisaillement. Enfin, même si cela peut paraître évident, plus la surface de mur couverte de grillage est grande, plus grande est la résistance.

Pour une construction neuve, il peut être intéressant de fixer le grillage aux renforcements verticaux entre le soubassement et la première rangée d'adobe. Le grillage reste alors roulé jusqu'à la réalisation du chaînage. On inclut dans les joints de mortiers des fils de fer régulièrement espacés fixés aux armatures. On peut alors dérouler le grillage en l'attachant au fur et à mesure aux fils de fer, et le fixer aux chaînage avant d'enduire le tout avec un enduit au ciment (de 4cm d'épaisseur d'après les recommandations de la PUCP). Les coins ne peuvent malheureusement pas être recouverts à cause des contreforts. Par contre, des fils de fer judicieusement disposés dans les joints permettent de solidariser les bandes de grillage avec l'armature verticale. Il serait intéressant d'étudier l'efficacité respective des contreforts et d'un grillage couvrant les coins du bâtiment, pour voir si une des solutions est préférable.

L'importance de l'enduit au ciment ayant été observée, il serait intéressant d'étudier l'influence des caractéristiques de cet enduit sur la résistance de l'ensemble. On peut en effet penser à l'ajout de fibres (plastiques ou métalliques) dans l'enduit pour en augmenter la résistance, sans pour autant entrer dans le domaine des bétons haute performance dont l'application serait ici délicate. Le kah-gel n'a probablement pas une résistance suffisante pour assurer cette augmentation de la résistance au cisaillement, mais son influence pourrait être étudiée.

L'illustration ci-dessous montre (de droite à gauche) les différentes étapes de montage des filets extérieurs.



1 - Using industrial material for the construction of safe adobe houses in seismic areas / M. Blondet, D. Torrealva, G. Villa Garcia, F. Ginocchio, I. Madueño /Lima: Pontifical Universidad Catolica de Peru

Choix des solutions

Je présente ici de nombreuses solutions, la plupart validées par des essais, certaines à l'état de proposition. Les renforcements horizontaux et verticaux ainsi que le chaînage sont obligatoires. Ce sont des solutions éprouvées. Le choix du matériau de renforcement, étant donné le manque de critères techniques de comparaison, se fera sur les autres critères suivant le contexte (économie, facilité de mise en oeuvre, disponibilité, acceptation).

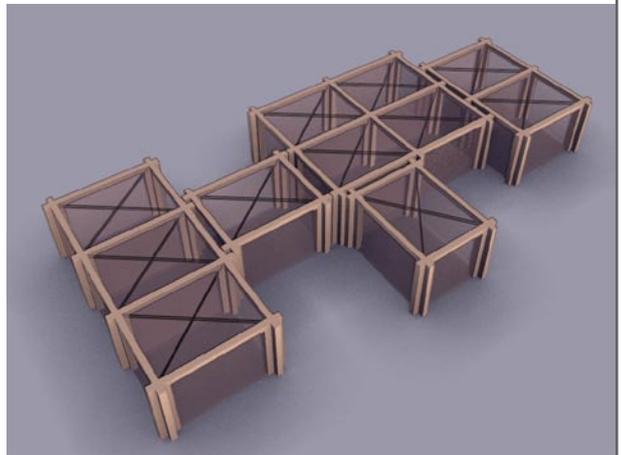
L'utilisation de grillage extérieur ne peut qu'améliorer le comportement de la structure si les moyens le permettent. Son utilisation seule semble efficace d'après les quelques essais effectués. Cependant, on manque d'expérience au long terme sur cette technique. Je ne la propose donc qu'en complément des autres.

Par ailleurs, il semble que chacune de ces techniques influe sur des paramètres différents (ductilité, résistance à la traction, au cisaillement, élasticité, amortissement) et elles peuvent donc être considérées comme complémentaires, tant que des essais n'auront pas montré l'éventuelle redondance de certaines.

Pour les constructions en brique cuite, on utilise parfois des cadres d'ouverture en métal renforcés qui jouent le rôle de chaînage. Cette technique semble ne pas avoir été testée avec de la maçonnerie d'adobe mais pourrait être intéressante.

Le premier prototype exposé ici a comme avantage sa simplicité mais on peut lui reprocher cette même simplicité, notamment au vu de certaines techniques constructives Bami décrites auparavant. Par ailleurs, la présence de contreforts pose des problèmes quand il s'agit d'accoler différents modules. Il reste en effet des espaces résiduels en pratique inaccessibles qui posent des problèmes d'entretien.

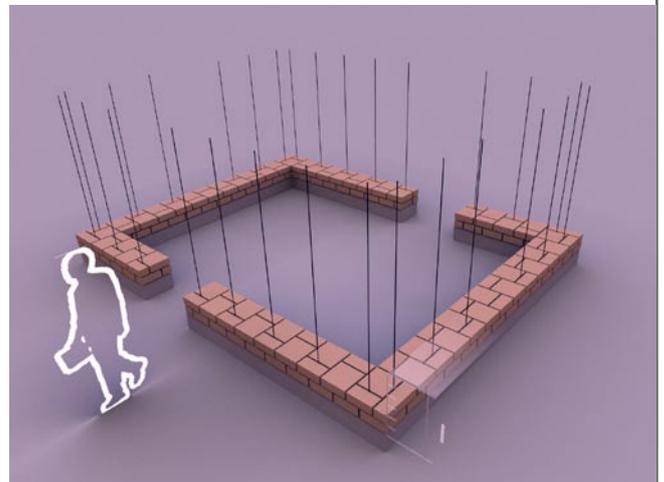
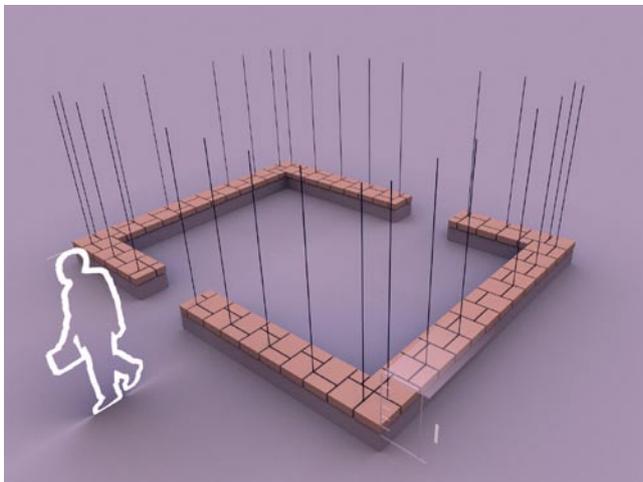
On peut imaginer qu'un module sans contreforts combinant tous les renforcements décrits ici pourrait se comporter de manière satisfaisante en cas de séisme. Cependant, l'expérience a montré qu'il faut garder à l'esprit qu'une construction peut être copiée et reproduite par des habitants l'ayant vu, mais n'ayant pas forcément suivi sa construction et donc n'ayant pas connaissance à priori des renforcements. Dans cette optique, et suivant le principe de précaution, il vaut mieux garder des éléments visibles comme les contreforts.



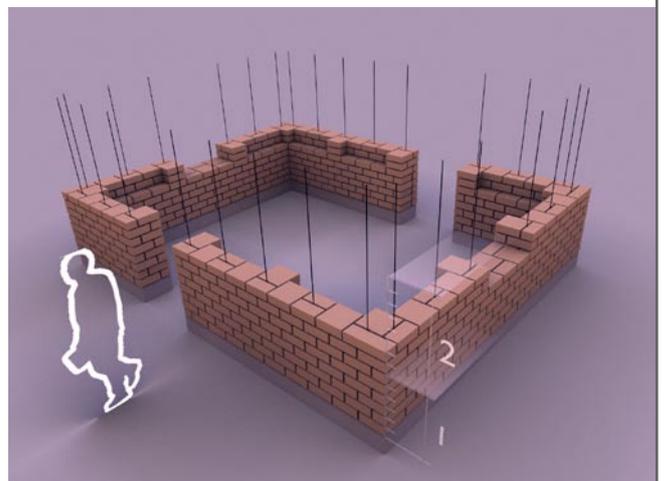
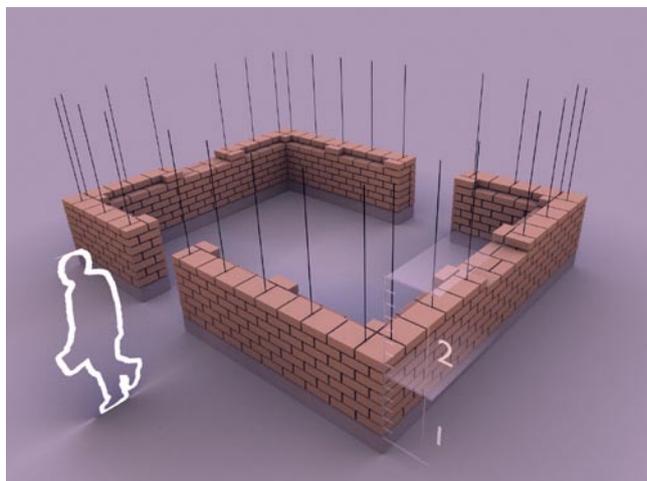
Murs: prototype 2

L'idée de départ de ce deuxième prototype était de concevoir un module de même dimensions mais plus recherché et ne posant pas le problème des contreforts. Les niches que l'on voit dans de nombreux bâtiments de Bam ont servi de référence pour concevoir un module dont les contreforts sont situés à l'intérieur. Même si cette configuration est à priori moins efficace, elle devrait permettre d'obtenir un bâtiment résistant en combinaison avec les autres renforcements décrits pour le prototype 1. Les principes des fondations et des renforcements sont donc les mêmes que ceux décrits précédemment, je ne les détaillerai pas de nouveau. La principale différence se situe au niveau du calepinage décrit dans la séquence ci-dessous. Il est beaucoup plus complexe et nécessite des briques spéciales (quart et longue) ainsi que de couper des briques pour les départ d'arcs.

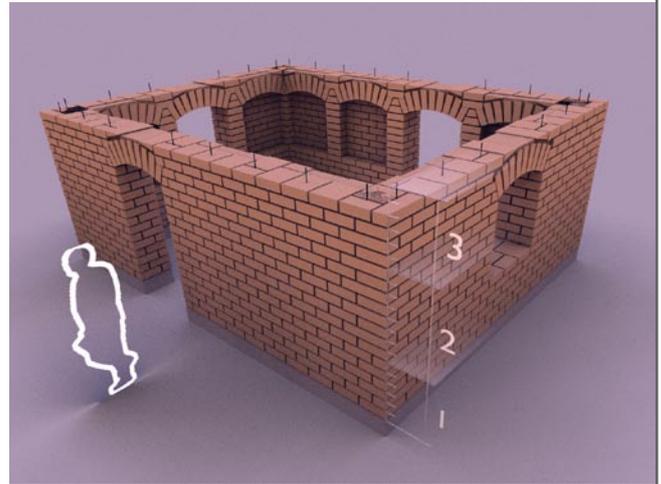
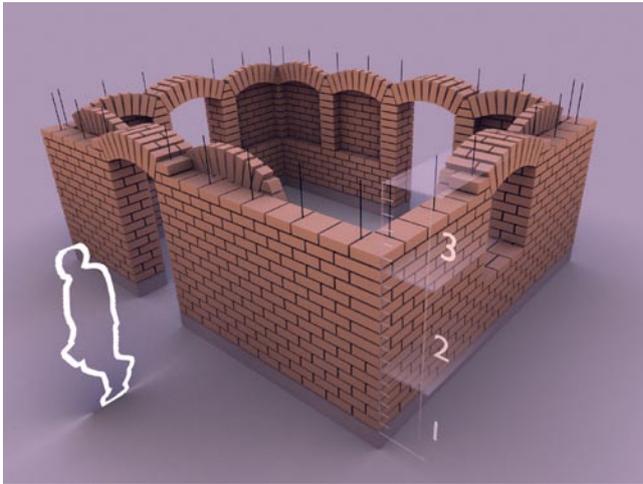
Appareillage des six premières assises:



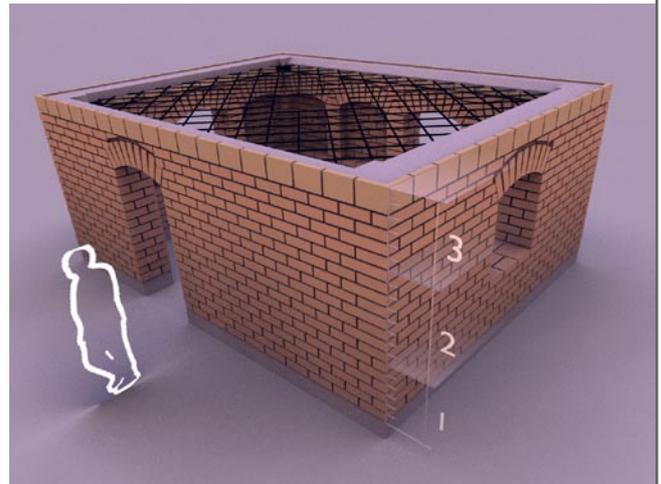
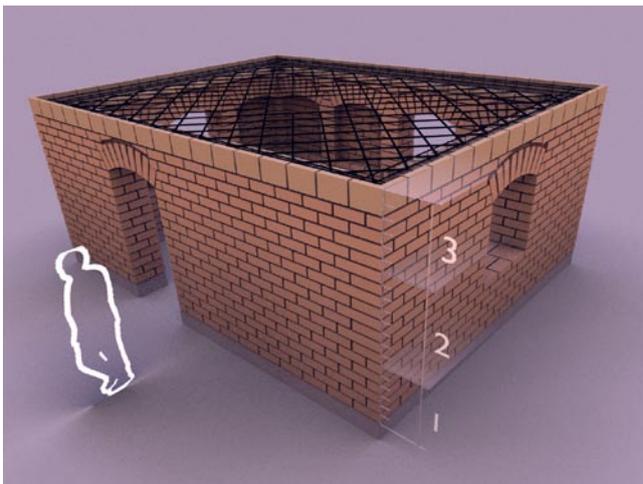
Appareillage des huit assises suivantes:



Montage des arcs:



Ferrailage du chaînage et celui-ci coulé:



Les niches pourraient éventuellement être ouvertes sur toute leur hauteur. L'allègement provoqué se situant dans le bas du mur, il ne devrait pas modifier de manière significative le comportement. L'arc est placé juste sous le chaînage et réalisé à l'aide de demi-briques. Ses faibles épaisseur et portée et le fait qu'il soit chargé permettent de se passer d'un dimensionnement étudié précisément. Les arcs seront coffrés avantageusement avec des coffrages métalliques étant donné qu'il faudra construire de nombreux modules et que chacun a plusieurs niches.

On peut envisager pour les mêmes raisons un montage de l'arc en *lapush* comme sur la photo ci-contre ce qui permet d'économiser le coffrage. Cependant, cette technique donne des résultats moins bien finis et présente plus de risques de malfaçon en cas de main d'oeuvre faiblement qualifiée.



Un autre moyen d'économiser le coffrage avec moins de risque est de réaliser un encorbellement en haut de niche, mais cela oblige à produire des briques spéciales ou à en couper. Cette solution devrait être la moins coûteuse, tout en étant facile à réaliser.



Pour les ouvertures, on a de nouveau la possibilité d'avoir des allèges pleines ou non, mais j'opte pour des allèges vides pour des raisons esthétiques en plus du fait qu'elles soient réputées plus adaptées au contexte sismique.

Le chaînage est donc nettement plus large que pour le prototype 1, ce qui peut être très intéressant dans le cas de voûtes surbaissées pour reprendre les efforts transversaux. Cela permet aussi d'inclure le treillis métallique plus facilement. On dispose en effet de 35 cm pour y loger les armatures et le béton.

On peut regretter de ne pas pouvoir placer de filet métallique sur les murs intérieurs, mais on peut par contre recouvrir convenablement les coins pour éviter leur séparation.

Dans le cas de combinaisons de modules, les murs de refend ont des niches des deux côtés. On se limitera aux mêmes combinaisons que pour le prototype 1 pour garder une certaine stabilité de forme et symétrie.

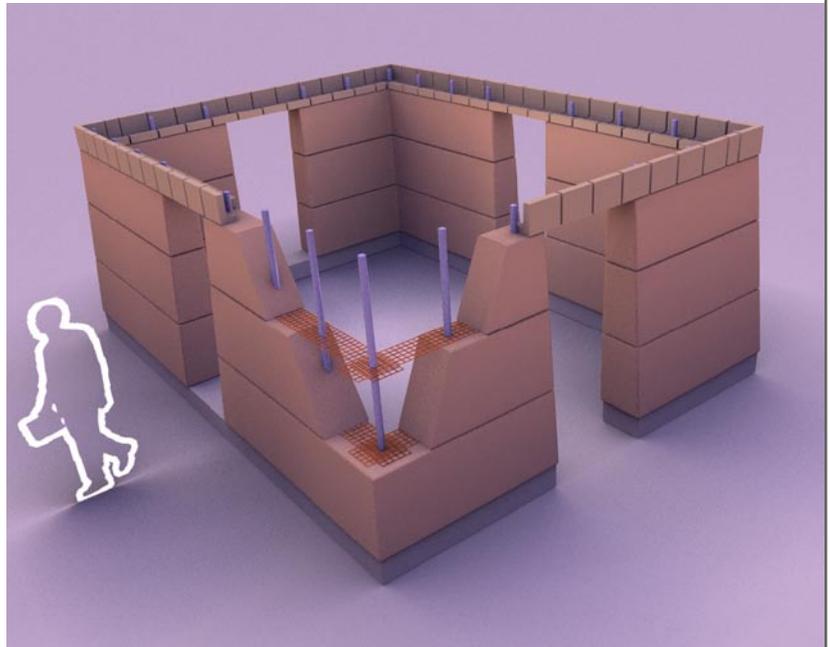
Murs: prototypes 3 et 4 en chiney

Les test de la PUCP sur le pisé ont montré que les fissures de retrait n'avaient aucune influence sur la résistance au cisaillement. Les murs en pisé renforcés de canes verticales et horizontales étaient deux fois moins résistants mais n'avaient plus d'effondrement brutal. On peut utiliser ces résultats comme point de départ pour imaginer des solutions de renforcement du chiney. Par ailleurs, l'utilisation de rangées d'adobes ou de briques cuites entre les assises de chiney pourraient avoir une influence positive sur le caractère parasismique des murs en bauge. Le fruit important des murs, ici uniquement à l'extérieur, permet de diminuer l'inertie des murs en partie haute.

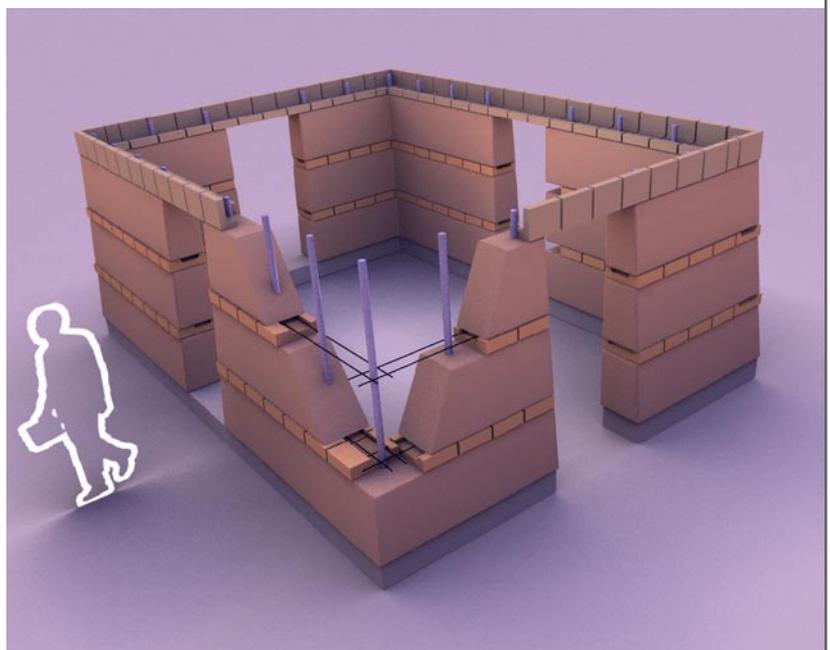
Je propose donc deux prototypes comme première expérimentation de ce que pourrait être une utilisation du chiney pour la construction d'habitations à Bam. Cependant, ces prototypes sont problématiques du point de vue de l'acceptation par les populations, étant donné la mauvaise image de ce matériau et le fait qu'il n'y aie pas à Bam de culture de la construction de logements en chiney. Mais je pense que cette technique a démontré une certaine résistance et offre assez de potentiel pour que l'on s'y intéresse.

Pour les renforcements, l'impossibilité pratique de les enrober dans du mortier pour les protéger de la corrosion rend l'utilisation de fers à béton problématique.

On peut donc les remplacer par des filets plastiques et des tubes en PVC, solution qui s'est avérée efficace pour la maçonnerie¹.



On pourrait séparer les assises par des rangées de briques cuites ou stabilisées. En utilisant des briques en forme de U, on pourrait alors noyer des fers à béton dans du mortier comme renforcements horizontaux.



1 - Using industrial material for the construction of safe adobe houses in seismic areas / M. Blondet, D. Torrealva, G. Villa Garcia, F. Ginocchio, I. Madueño / Lima: Pontifical Universidad Católica de Peru

Couvertures

Il serait possible et facile de couvrir les modules décrits ci-dessus avec des couvertures «standard». On peut évoquer par exemple des toitures en bac acier avec un faux plafond aéré permettant de palier en partie les inconvénients thermiques de ce type de couverture. Une toiture terrasse en béton armé faisant diaphragme peut aussi être appropriée en faisant attention lors de son dimensionnement à ne pas avoir de poids excessif.

On peut aussi penser à des couvertures voûtées en béton armé préfabriqué, comme l'équipe de CRATerre-EAG en a proposé pour ses prototypes. Des coques minces en béton armé permettrait d'avoir des coupoles ou des voûtes ayant une très bonne résistance aux tremblements de terre. On pourrait même imaginer des voûtes légères et économiques en tôle ondulées cintrées sur des fermes métalliques.

Ces solutions, et sûrement bien d'autres encore, ont comme principal avantage d'utiliser des matériaux standard et donc plus facilement acceptables par les constructeurs et les autorités en charge de la validation du caractère parasismique des bâtiments. Je ne discuterai pas ici de leurs différents avantages et inconvénients.

J'ai choisi d'orienter mon travail sur les toitures en maçonnerie d'adobe, bien que certaines des solutions que je viens d'évoquer me semblent intéressantes à plus d'un titre. Ce choix, nécessaire notamment pour des raisons de temps, reste assez arbitraire mais repose cependant sur les bases suivantes:

- de nombreux travaux ont déjà été faits sur ces autres types de toiture.
- par contre, même si il y a des travaux d'observations et de description de la résistance aux séismes des voûtes et coupoles en terre, très rares sont les travaux concernant leur amélioration et renforcement (on peut cependant se référer dans la bibliographie aux travaux de Satprem Maïni et de Gernot Minke).
- il me paraît difficile de parler de continuité des cultures constructives en Iran sans aborder les arcs, voûtes et coupoles, non seulement au niveau de la forme mais surtout de la technique de maçonnerie.
- avec l'apport de nouveaux matériaux et nouvelles techniques, il me semble raisonnable de penser que l'on puisse aujourd'hui construire des structures parasismiques en terre qui ne soient pas que le plus simple et basique reflet de ce dont ont été capables les constructeurs iraniens.
- comme nous l'avons vu, la terre comme matériau de construction a de nombreux avantages écologiques, économiques, et sociaux qu'il est particulièrement important de prendre en compte dans un contexte de reconstruction à grande échelle.

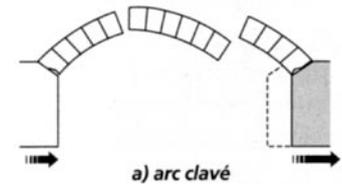
Comportement sismique des arcs, voûtes et coupoles.

Je ne parlerai pas ici du savoir-faire des maçons qui, comme nous l'avons vu, est indispensable pour assurer le caractère parasismique à d'une structure. De même, je supposerai que les éléments sont correctement conçus d'un point de vue statique.

Les premières observations que l'on peut faire à propos des arcs sont applicables aux voûtes qui sont des arcs «extrudés».

- sensibilité des arcs aux déplacements différentiels des appuis:

L'image ci-contre¹ montre de manière simplifiée ce qui peut se passer en cas de mouvement différentiel des appuis de l'arc. On peut supposer par une observation géométrique que plus l'arc est surbaissé, plus il est sensible à ce phénomène.



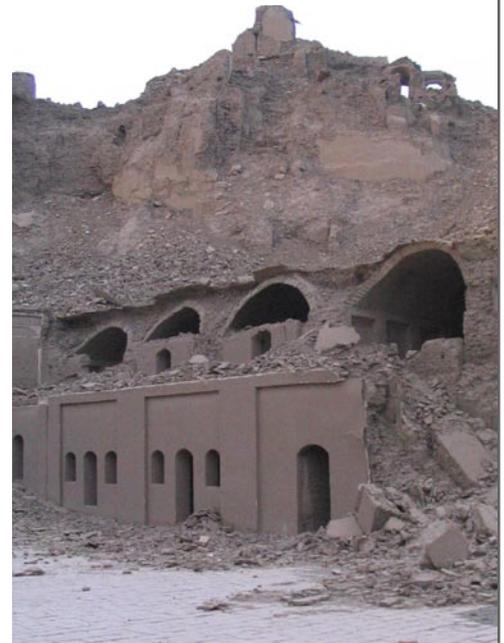
- modification de la ligne des pressions sous action sismique:

Si l'arc a une section en forme de caténaire, la ligne des pressions reste au centre de l'arc assurant ainsi la stabilité statique de la structure. Cependant, sous l'action des secousses sismiques cette courbe peut se déformer de manière importante. En effet les forces d'inertie, avec des accélérations pouvant atteindre 1 G comme à Bam, peuvent faire sortir la courbe du tiers intérieur de l'arc, entraînant sa rupture du fait de sa résistance à la traction quasiment nulle.

- faiblesses des voûtes:

Les voûtes sont asymétriques, ce qui est leur première faiblesse. Elles n'ont donc pas le même comportement suivant la direction des secousses. Ceci entraîne en outre que leurs supports ne sont pas sollicités symétriquement, ce qui peut entraîner des séparations des différents murs.

A Bam, les voûtes sont construites sans coffrage suivant la technique dite «nubienne», avec des assises inclinées. Cela rajoute encore de la dissymétrie. Elles comportent par ailleurs des bords libres qui ont tendance à se détacher sous action sismique, d'autant plus que les maçons redressent progressivement les rangées pour atteindre la verticale en façade. Ce phénomène a été systématiquement observé à Bam comme sur cette photo. La différence de comportement entre le mur pignon sur lequel s'appuie la voûte et la voûte elle-même est aussi une source de désordre, même si les observations faites à Bam ne l'ont pas relevé particulièrement.



-Résistance des coupoles:

Les coupoles et voûtes à double courbure sont beaucoup plus résistantes de par leur forme même. Elles ont en effet une grande rigidité spatiale, sont beaucoup plus symétriques et n'ont pas de bord libre. Leur comportement qui peut s'approcher de celui d'une coque, leur permet de résister à des efforts beaucoup plus grands, à des déplacements différentiels de leurs appuis plus importants. Même en cas de fissuration ou d'effondrement partiel, une nouvelle répartition des forces leur permet souvent de ne pas s'écrouler.



-Pourquoi construire des voûtes ?

Au vu des éléments qui précèdent, on peut se demander quel est l'intérêt de construire des voûtes simples. Cela vient de la plus grande difficulté de construire une coupole. En effet, il est facile de réaliser des guides permettant d'avoir une section de voûte bien régulière, même avec de la main d'oeuvre moyennement qualifiée. Par contre, pour réaliser une coupole autre que sphérique, il est beaucoup plus compliqué de réaliser des gabarits et la compétence du maçon est absolument nécessaire pour assurer une forme correcte. Nous avons vu qu'à Bam il ne reste que quelques maçons capables de monter des coupoles, il faut donc proposer des alternatives.

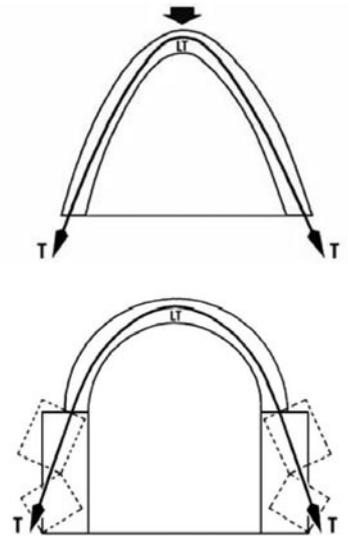


Détermination de la section

Je ne détaillerai pas les problèmes de comportement statique des arcs, voûtes et coupôles. On pourra se référer pour cela aux ouvrages cités dans la bibliographie. On retiendra juste que la section doit être tracée de telle sorte que la ligne des pressions reste dans le tiers intérieur de l'arc. Pour s'assurer de la stabilité statique, la forme idéale est la courbe caténaire donnée par la formule $y=ncosh(x/n)$.

En outre, les forces que la voûte applique à son support sont tangentes à la courbe des pressions, avec donc une composante horizontale dans la plupart des cas. La résultante de cette poussée horizontale et du poids de la voûte ne doit pas sortir du support sous peine de voir celui-ci s'effondrer, à moins d'avoir un chaînage reprenant cette poussée.

En faisant varier la valeur de n dans la formule de la caténaire, on obtient une courbe plus ou moins aplatie, comme le montrent les courbes ci dessous. Elles ont été tracées à la largeur des modules décrits précédemment, et on peut donc lire la hauteur qu'auraient des voûtes tracées avec ce profil.



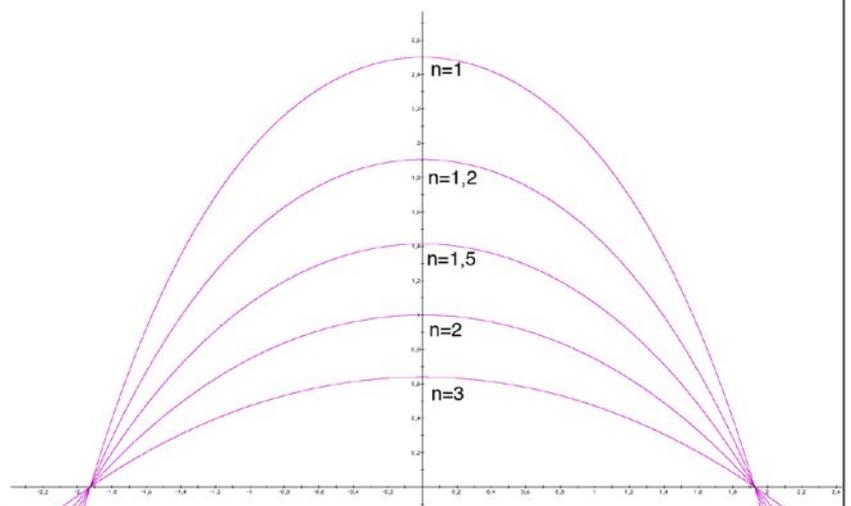
Le problème est ici de déterminer quelle valeur de n choisir. Celle-ci, et en conséquence la hauteur de la voûte, vont influencer les paramètres suivants :

- poussées horizontales qui augmentent avec n . Ce point ne me semble cependant pas primordial dans la mesure où l'on a un chaînage en béton armé renforcé par un «pseudo» diaphragme qui permet de reprendre ces efforts. Mieux vaut cependant avoir ces efforts les plus faibles possibles.

- sensibilité aux mouvements différentiels. Elle semble être plus importante pour les voûtes surbaissées.

- poids de la voûte. Celui-ci diminue quand n augmente. La longueur de la section développée est donnée par $s=2nsinh(x/n)$ avec x qui est ici la moitié de la portée de la voûte soit 1,92m.

- centre de gravité. En plus de l'augmentation du poids de la voûte, une petite valeur de n en augmentant sa hauteur va élever le centre de gravité du bâtiment, ce qui est déconseillé en zone sismique.



On prendra comme exemple le prototype 1. Celui-ci a un volume de murs d'environ 14,8 m³ et donc un poids approximatif de 22,2 tonnes. La voûte avec une épaisseur de 20 cm pèse au mètre linéaire de développée 1,8 tonnes. On obtient donc les valeurs approximatives suivantes:

n	développée (m)	% d'augm. (/ n=3)	Poids de la voûte (tonnes)	Hauteur du centre de gravité de la voûte (m)	Hauteur du centre de gravité du module (m)
1	6,7	63	12,2	4	2,97
1,2	5,7	39	10,4	3,6	2,78
1,5	5,0	22	9,1	3,27	2,65
2	4,5	9,8	8,2	3,01	2,56
3	4,1	0	7,4	2,79	2,5

On a pour n supérieur à 3 des variations de longueur et donc de poids inférieures à 5 %, mais une aggravation des problèmes des voûtes surbaissées. Je prends donc n=3 comme valeur maximale. Pour le prototype 2, étant donné son poids plus élevé, l'influence quant au centre de gravité sera encore plus faible.

Si l'on veut limiter l'augmentation de poids, il vaut donc mieux rester avec n supérieur à 1,5 c'est à dire une flèche inférieure à 1,5m. On voit alors que la différence de hauteur du centre de gravité du bâtiment est de 15 cm seulement.

Le problème est que si l'on peut définir l'influence de la flèche de la voûte sur chaque paramètre pris en compte, il est très difficile de déterminer quel paramètre a la plus grande influence sur le comportement du bâtiment. De même, la sensibilité aux mouvements différentiels et les poussées horizontales augmentent pour les voûtes surbaissées, mais il est impossible ici d'en quantifier l'influence sur le caractère parasismique du bâtiment.

Même si l'on ne peut pas tirer de conclusions précises, on voit qu'il vaut mieux rester avec n compris entre 3 et 1,5. J'ai pris pour la suite de mon travail n proche de 2 et une flèche de 1 m environ, en faisant attention d'avoir un nombre entier de briques dans la voûte.

Prototype de voûte 1

Deux arcs en béton armé préfabriqués permettent d'amorcer la voûte. Ils servent à la fois à retenir les rangées d'adobes des extrémités et comme gabarit. Ils donnent l'inclinaison exacte des assises et leur section. Des ficelles tirées entre les deux arcs permettent d'aider les maçons à garder la section de la voûte.

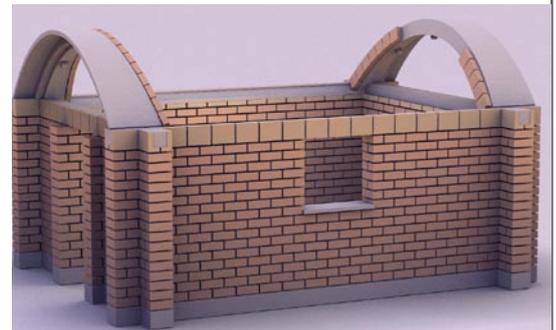
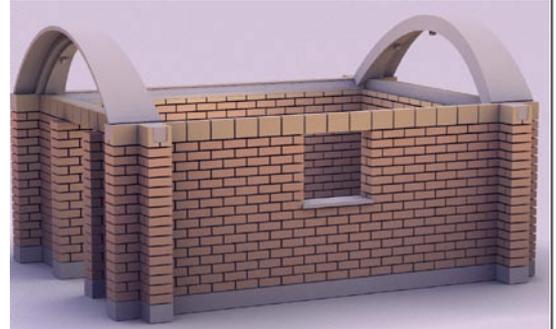
Les arcs sont ancrés dans le chaînage et doivent être correctement positionnés. Ils sont autostables et sont prévus pour recevoir des menuiseries. On n'a pas, comme dans le système traditionnel, d'assises incomplètes pour commencer la voûte.

Une fois les deux demi-voûtes proches (la distance idéale devra être déterminée par la pratique), l'espace restant est comblé par des assises horizontales qui devraient être faciles à monter si suffisamment courtes. Cette technique est connue des maçons pour finir les voûtes en trompe d'angle. Son avantage est qu'elle tend à se stabiliser sous son propre poids.

Cela me semble préférable à une jonction des deux moitiés en épis. Celle-ci ne pourra être faite précisément, dépendant de l'épaisseur des joints entre autres. En outre, elle a tendance à s'ouvrir sous son poids, les assises d'adobes s'écartant les unes des autres. Cependant, la maîtrise de certains maçons pourrait être suffisante pour avoir un résultat efficace.

Les deux arcs en béton armé pourront alors être solidarisés par des tirants en acier dont le nombre et les ancrages sont à déterminer avec soin pour éviter des problèmes de concentration de contrainte. On devrait alors avoir un ensemble stable dont le comportement réel en cas de secousse est cependant difficile à prévoir. Mais le système de montage permet d'être sûr d'avoir les différentes assises bien en appui les unes sur les autres et ainsi une transmission d'efforts la plus régulière possible.

Précontraindre l'ensemble avec un système de boulon sur les tirants pourrait être intéressant, mais l'influence de la précontrainte sur la cohésion des joints est à étudier. La détermination de la précontrainte est complexe. Cela oblige par ailleurs à ne fixer les arcs au chaînage qu'après le montage de la voûte pour permettre de répartir la précontrainte sur l'ensemble de l'arc.



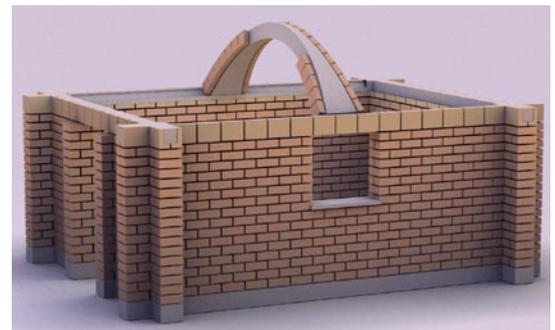
Prototype de voûte 2

On a ici un seul arc faisant office de gabarit, ancré dans le chaînage au milieu de la voûte. Deux autres gabarits en métal peuvent être fixés aux extrémités de la voûte pour pouvoir tendre des ficelles pour guider les maçons.

Les assises sont alors montées symétriquement pour ne pas déséquilibrer l'ensemble. Une fois en bout de voûte, des arcs préfabriqués en béton armé sont posés sur la dernière assise et ancrés au chaînage. Les arcs des extrémités sont alors solidarisés par des tirants selon le même principe.

Les arcs des bords peuvent être fins comme ici, ce qui donne alors une voûte à bords inclinés assez esthétique. Par contre cela oblige à avoir des contreforts en façade, ne permet pas d'ancrer l'arc à la verticale des coins des murs, et oblige à fixer la menuiserie dans la maçonnerie.

On peut aussi avoir des arcs à profil triangulaire pour avoir un bord de voûte vertical qui supprime les problèmes ci-dessus.



Une autre méthode de montage est d'utiliser un coffrage pour démarrer la voûte en son milieu et ainsi se passer de l'arc en béton armé. Une fois les premières assises montées et équilibrées, le coffrage n'est plus nécessaire. Cette technique demande cependant une main d'oeuvre très qualifiée pour assurer un bon départ des assises et éviter une ligne de faiblesse au milieu de voûte.

Augmentation de la résistance à la traction des voûtes

Comme nous l'avons vu, la résistance à la traction de la maçonnerie peut être considérée comme nulle, ce qui ne pose aucun problème en statique pour une voûte en forme de caténaire. Par contre, sous l'action de secousses sismiques, cette fragilité peut bien souvent entraîner l'effondrement de la voûte. La résistance à la traction doit donc être apportée par d'autres matériaux.

La difficulté vient ici du fait que l'on doit armer un élément de maçonnerie courbe. A part les travaux de Gernot Minke¹ pour armer une voûte avec des bambous en utilisant des adobes spéciales, je n'ai pas trouvé de références de travaux sur ce sujet. Par contre, les recherches de la PUCP sur l'utilisation de grillages et filets plastiques et geosynthétiques² pour renforcer les murs peuvent servir de point de départ.

En effet, il paraît difficile d'utiliser des matériaux rigides étant données les inévitables variations de forme des voûtes maçonnées. L'armature doit donc avoir assez de souplesse pour s'adapter à la maçonnerie mais assez de résistance pour apporter une amélioration. Les fers à béton sont donc à exclure, ainsi que les cornières ou tubes.

Les câbles ou cordes me semblent aussi être inadaptés car leur surface de contact avec la maçonnerie est très faible. On risque donc de voir apparaître des concentrations de contraintes qui pourraient finalement avoir l'inverse de l'effet escompté en cas de tremblement de terre.

Les filets ou grillages présentent eux l'avantage d'être souples et de bien répartir leur action sur une grande surface. Par contre, les filets en polyéthylène semblent être trop extensibles et pas assez résistants. On s'orientera plutôt vers des grillages soudés résistants à la corrosion ou des geotextiles. Ils sont en outre très répandus et d'un coût assez faible.

Il est nécessaire de précontraindre le filet au tour de la voûte pour s'assurer que celui-ci s'applique bien sur l'ensemble des briques. La voûte devra être sèche pour ne plus présenter de retrait. Le fait de précontraindre l'arc apporte en outre une modification très intéressante de la ligne de pressions. En effet, si la précontrainte est appliquée régulièrement sur toute la surface de l'arc, elle rajoute aux forces s'exerçant déjà des efforts uniformément répartis et normaux à la courbe. Ces efforts supplémentaires feront que la ligne de pression se rapprochera de la courbe de l'arc, limitant le risque de la voir sortir de la zone de stabilité. On peut simplifier en disant que cela revient plus ou moins à charger la voûte, ce qui la stabilise, mais sans rajouter de poids, ce qui aurait un effet négatif sur le caractère parasismique.

Le but n'est pas ici bien sûr de rendre stable des structures qui ne le seraient pas sans précontrainte. Il s'agit d'augmenter la stabilité de structures dont la forme a été correctement conçue. Il faut pour cela déterminer la force de précontrainte suffisante, sans que celle-ci ne nécessite des solutions techniques difficiles à mettre en œuvre (ni bien sûr qu'elle ne dépasse la résistance des éléments de maçonnerie). Par contre, le comportement dynamique de ce genre de structure est impossible à prévoir de manière réaliste et c'est à ce point que ce travail théorique atteint ses limites. Seul des essais sur tables sismiques pourraient fournir des résultats réellement exploitables. La difficulté serait ensuite de faire le lien entre ces résultats et leur mise en application notamment l'évaluation de la précontrainte sur le chantier.

En pratique, le fait de placer les bandes de filet directement sur les adobes avant de les recouvrir d'enduit ciment (toujours suivant les recommandations de la PUCP) risque de poser des problèmes pour la répartition des efforts. Les irrégularités de la surface vont en effet accrocher les mailles à certains endroits et il peut être fastidieux d'avoir à tirer par endroits dessus pour tenter de le mettre correctement en place. A l'opposé, placer les bandes sur une première couche d'enduit résoudrait ce problème, mais la cohésion des deux couches d'enduits sera moindre et les filets beaucoup moins solidaires de l'enduit, ce qui limite leur résistance au cisaillement dans leur plan (à moins d'avoir un grillage triangulé). Ce point n'est pas forcément gênant, dans la mesure où la précontrainte assure la liaison entre voûte et filet (contrairement au cas des murs). Encore une fois, des essais permettraient de mesurer l'importance du phénomène. Une troisième possibilité permet de résoudre ces problèmes mais au prix d'une plus grande complexité de mise en œuvre. Des bandes de mortier d'épaisseur constante peu espacées perpendiculaires à l'axe de la voûte permettent de précontraindre les filets tout en gardant un espace entre ceux-ci et la maçonnerie. Ainsi, l'enduit au ciment permet de bien enrober les mailles sur une grande partie de la surface. Par contre, l'irrégularité de l'application des efforts peut compromettre l'efficacité de l'ensemble.

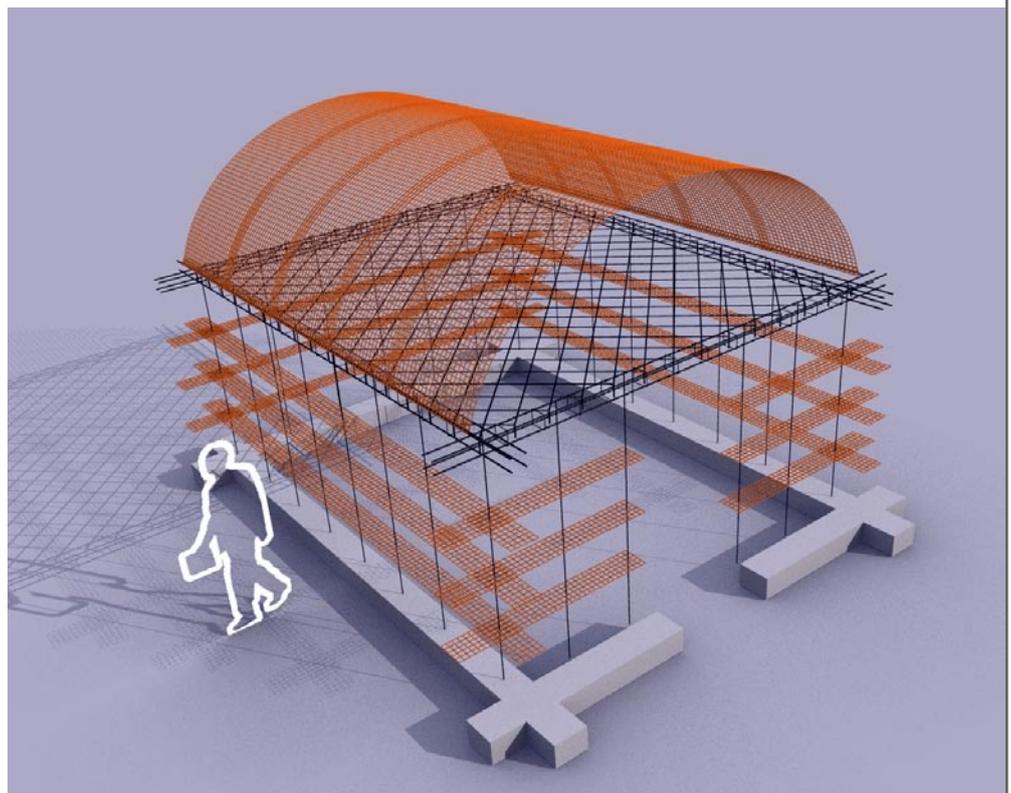
1- Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth / Gernot Minke / Eschborn: Gate-Basin, 2001

2- Using industrial material for the construction of safe adobe houses in seismic areas / M. Blondet, D. Torrevalva, G. Villa García, F. Ginochio, I. Madaueño / Lima: Pontifical Universidad Católica de Perú

Les filets doivent être fixés au chaînage. On prévoit pour cela de laisser dépasser les fers à béton des armatures verticales. Le système pour tendre les filets doit être simple à mettre en oeuvre, résistant et de plus faibles dimensions possibles. Il doit permettre de serrer les filets au plus près de la voûte possible, pour en appliquer les effets sur la plus grande partie. On trouvera ci-dessous une première ébauche pour deux systèmes:

Le moyen le plus simple de tendre les filets est de les enrouler de chaque côté de la voûte sur un fer à béton que l'on peut tourner avant de le bloquer en le cintrant et de le recouvrir avec l'enduit au ciment. Bien qu'il soit possible de le déterminer par calcul, on pourra faire des essais avec dynamomètres pour avoir approximativement le nombre de tours à donner pour avoir une tension suffisante. La nécessité d'avoir un enrouleur de chaque côté ou un seul dépend de la friction entre les filets et leur support qui doit être la plus faible possible pour obtenir une répartition uniforme. Deux enrouleurs augmentent les chances d'avoir une répartition symétrique.

On peut aussi utiliser un système de plaques fixées au chaînage entre lesquelles passe le filet. Ces plaques pourront avoir des reliefs pour augmenter leur adhérence. Le filet est tendu avec un système quelconque, un dynamomètre indiquant la tension, et l'on serre très fortement les plaques ensemble pour bloquer le filet. On peut souder les écrous de serrage pour les bloquer. L'ensemble est ensuite noyé dans l'enduit.



Choix du type de voûte

Le choix entre ces deux types de montage est difficile à faire, le facteur le plus important à prendre en compte, à savoir le comportement sous secousse sismique, ne pouvant être prévu sans essais. On peut par contre faire les remarques suivantes:

- le prototype 1 présente une faiblesse en milieu de voûte, faiblesse facilement aggravée en cas de travail peu soigné. Le fait que les assises soient inclinées vers l'extérieur de la voûte pourrait avoir une influence négative sur le comportement dynamique, mais ce point ne sera défini qu'après des essais sur table sismique. Par contre, il ne nécessite que deux arcs en béton armé et ceux-ci peuvent servir de gabarit.

- le prototype 2 (sans coffrage) ne présente pas cette faiblesse en milieu de voûte et est d'un montage plus aisé sans aucune découpe de brique. Les assises sont orientées vers l'intérieur de la voûte ce qui pourrait en accroître la stabilité. Il nécessite cependant trois arcs en béton armé et des gabarits en bout de voûte. Avoir trois arcs augmente par ailleurs le risque de réaction différente de comportement entre les arcs et la maçonnerie.

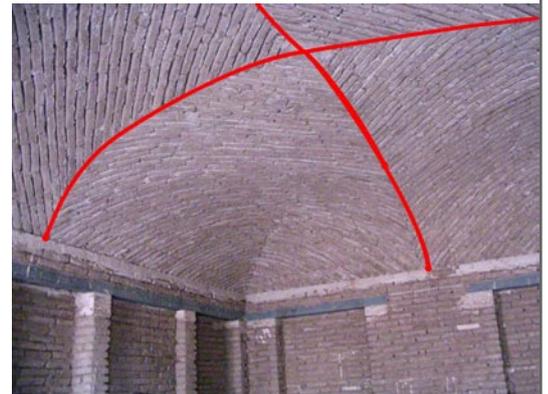
On peut reprocher à ces solutions leur complexité et le mélange de types de structures différents dont la compatibilité en cas de tremblement de terre reste à étudier. Leur coût de construction dû à l'utilisation de matériaux industriels et préfabriqués, et avant cela le travail de conception qui devra être plus poussé, en font des solutions relativement coûteuses. Elles ne pourront pas être assimilées par des artisans sans véritable formation. Leur appropriation par les populations me semble encore plus difficile.

C'est le prix à payer pour tenter de rendre parasismiques des formes qui ne le sont pas intrinsèquement. Je pense que ce système est viable dans un contexte de construction à grande échelle fait par des entreprises. C'est le cadre de ce travail qui concerne la construction de bureaux et logements en quantité importantes en gardant à l'esprit les possibilités d'application à la reconstruction de logement en ville.

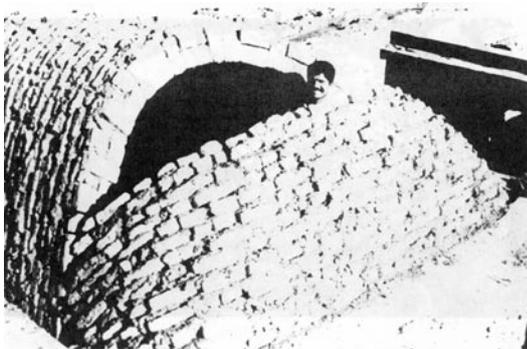
Voûtes à double courbure

La conception des voûtes à double courbure est beaucoup plus simple. En effet elles possèdent une bien plus grande stabilité de forme et n'ont pas de bords libres. Si la stabilité de leurs appuis est assurée et que leur forme est correctement tracée, les faiblesses de ces proviennent en général du manque de qualification de la main d'oeuvre. Il est cependant important de choisir un appareillage qui limite les faiblesses de la maçonnerie. On a le choix, en reprenant des techniques utilisées à Bam entre les voûtes en trompe d'angle, les plus courantes, ou les voûtes en navettes. Même si il est impossible ici de déterminer lequel de ces modes de construction aurait un meilleur comportement, l'observation montrant qu'il est bon dans les deux cas, on peut faire quelques remarques sur les lignes de faiblesses de chacun.

Les voûtes en trompe d'angle présentent quatre lignes de rencontre d'assises, en épi qui peuvent représenter des faiblesses, surtout en cas de mauvais travail. Dans le cas de voûtes sur plan carré, il est plus facile d'avoir une jonction des quatre trompes parfaitement appareillée et donc plus résistante. Par contre, les assises sont à peu près parallèles les unes aux autres, avec donc des joints d'épaisseur plutôt constante.



Les voûtes en navette ne présentent qu'une ligne de faiblesse à leur fermeture (ou deux dans le cas d'une fermeture par le centre). Par contre, le fait de redresser petit à petit les assises d'adobe pour passer de l'horizontale à la presque verticale entraîne plus d'irrégularités dans les joints, qui sont autant de sources de faiblesse en cas de mauvais travail.

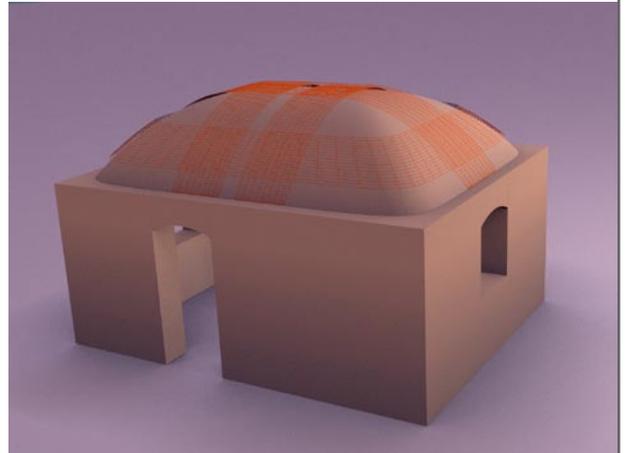


Le point le plus délicat avec ces voûtes que l'on peut apparenter à des coupôles est que, même si l'utilisation de gabarits dans les diagonales est possible, la gaucherie des assises fait que la qualité géométrique dépend au final uniquement de la maîtrise du maçons et tant de l'acuité son oeil que de l'habileté de sa main.

Le renforcement des voûtes à double courbure est par contre plus problématique. On peut leur appliquer de même des systèmes de filets suivant le même principe que pour les voûtes à simple courbure.

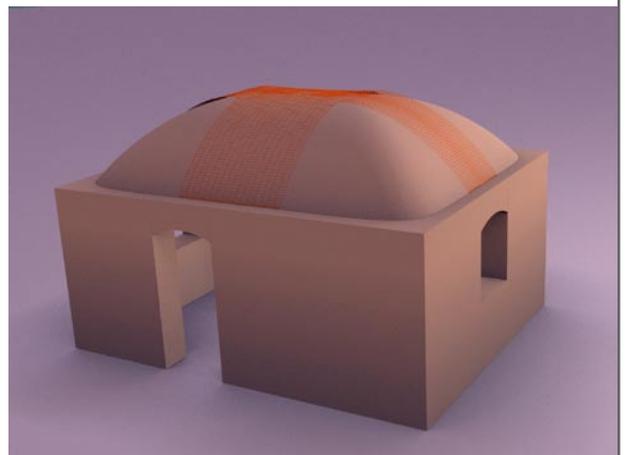
On peut sur la partie centrale de la voûte disposer des filets perpendiculaires à sa grande longueur. Mais aux extrémités, il est impossible d'appliquer ces filets uniformément sans les déformer fortement et donc générer des forces irrégulières dont les conséquences sont difficiles à prévoir. Si on les applique parallèlement à la grande longueur, on peut cependant jouer sur l'élasticité des filets, mais celle-ci sera probablement difficile à contrôler, et étant donné la longueur du renforcement, une trop grande élasticité nuirait à l'efficacité, à moins que les frottements entre filets et voûte ne limitent les déformations localement. En prenant des largeurs de filet réduites, on diminue le problème.

On peut aussi installer des filets qui ceinturent la voûte. Ceux-ci devront de même être assez fins pour s'adapter à la forme. On se contentera d'en placer là où des fissures ont le plus de chance d'apparaître (ce qui peut être déterminé par essais sur une voûte non renforcée).



Une autre solution, qui assurerait en théorie une meilleure efficacité, serait de prendre une grande pièce de filet en croix qui recouvrirait l'ensemble de la voûte. La disponibilité et le coût d'un tel renforcement risquent d'être pénalisants, mais c'est surtout au niveau de la mise en oeuvre que cette technique me semble hasardeuse. Ce filet serait en effet beaucoup plus difficile à appliquer uniformément, surtout en cas d'irrégularité de la forme de la voûte. On aurait alors des plis qui pourraient rendre la mesure partiellement inefficace.

Si l'on sort des solutions bon marché et facilement disponibles, on peut envisager des expérimentations avec des calottes tissées, ce qui est possible techniquement mais à un coût probablement rédhibitoire. La forme de la calotte serait alors suffisamment proche de celle de la voûte pour que son élasticité assure une bonne répartition des efforts.



Finalement, étant donné la relative stabilité naturelle de ces structures et leur faible portée, je suppose que les solutions les plus simples seraient suffisantes.

III.2.3 Pistes de recherche

On ne peut que constater que ces propositions, qui restent déjà à approfondir, tester et valider, semblent bien modestes comparées à l'héritage qu'ont laissé les constructeurs iraniens, héritage qui a parfois déjà subi des séismes sans graves dommages. Je propose donc ici quelques pistes de recherche pour permettre d'expérimenter et à long-terme, peut-être, utiliser des structures plus ambitieuses, au niveau de la forme et de la portée.

Coupoles circulaires

Les coupoles sur plan circulaire ont montré de manière générale un très bon comportement face au séisme. Ceci vient principalement de leur grande stabilité de forme. Leur relative simplicité de construction permet aussi d'en assurer plus facilement la qualité ce qui a sûrement eu une influence.

Elles semblent donc assez propices à être améliorées et utilisées pour couvrir de plus grandes portées. Leurs faiblesses résident en général, comme pour la plupart des couvertures maçonnées, dans leur liaison avec leur mur, ainsi que dans la stabilité de celui-ci. Les solutions traditionnelles ont en général un mur très épais, et l'épaisseur de la coupole est décroissante avec sa hauteur. Il faut cependant se rappeler que «les murs courbes en maçonnerie ne conviennent pas en zone sismique, étant donné leur faible résistance à la traction et au cisaillement»¹.

Les améliorations que l'on peut apporter sont tout d'abord du même type que celles évoquées plus haut, à savoir des renforcements horizontaux et verticaux et un chaînage haut. L'utilisation de filets permettrait par ailleurs d'améliorer encore la faiblesse des murs, et éventuellement de renforcer la coupole, bien que les difficultés évoquées pour les voûtes à double courbure soient ici encore plus importantes. Par contre, l'horizontalité des assises de briques permet d'envisager d'inclure dans les joints de mortier de renforcements horizontaux, sous forme de cordes ou filets fins.

Pour la maçonnerie des murs, afin d'en augmenter la régularité et diminuer la taille des joints, on pourrait utiliser des adobes trapézoïdales comme cela a été observé dans un bâtiment en dehors de Bam, à quelques km au nord.

Le choix de les réaliser en encorbellement ou non est difficile à faire, mais les coupoles en encorbellement semblent plus faciles à réaliser pour des sections autres que circulaires qui peuvent être facilitées par l'utilisation de pige.

Coupoles en pendentifs et arcs

Les coupoles en pendentifs sont en général assises sur deux murs et deux arcs, qui constituent une de leur principale faiblesse. On ne peut donc pas aborder leur utilisation sans essayer d'améliorer la résistance des arcs.

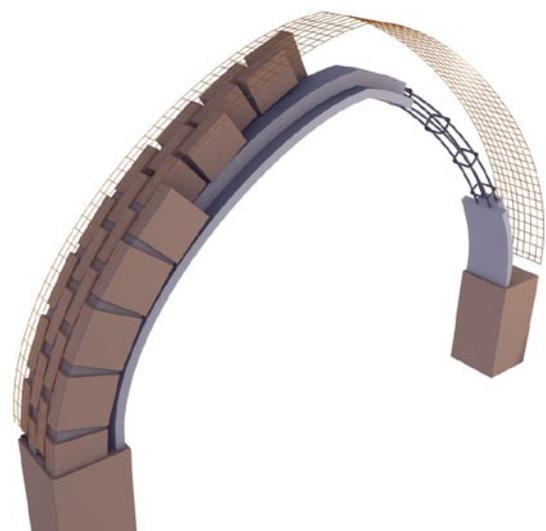
Leur comportement est délicat à appréhender. Ils ne sont en effet pas chargés uniquement verticalement et leur stabilité conditionne celle de la coupole. Leur conception doit donc faire l'objet d'un soin particulier. Comme nous l'avons vu, les arcs construits traditionnellement en adobe présentent une résistance à la compression en général suffisante, pour peu que leur forme soit correctement conçue.

Il serait intéressant d'étudier les différences de comportements entre un arc traditionnel et un arc monté avec des briques perpendiculaires à la courbe de l'arc. Le principal avantage de l'arc traditionnel est sa rapidité de mise en oeuvre et la possibilité de le monter sur un lengeh, arc en plâtre armé de roseaux et de cordes, de faible résistance. Ses inconvénients sont des joints plus épais, et le risque de séparations des différents arcs le composant, selon des plans ne subissant que peu de contraintes. Par contre, l'arc à briques radiales a l'avantage d'avoir des plans de mortiers uniquement perpendiculaires à la descente de charge principale, d'avoir des joints moins épais, mais plus nombreux et a priori nécessite un coffrage en bois pour être monté. Nous resteront donc dans nos exemples sur des montages traditionnels.

On peut facilement transposer les techniques de filets proposés pour les voûtes aux arcs, même en conservant le montage à l'aide de lengeh. L'inconvénient est de ne pas vraiment augmenter la résistance de l'arc perpendiculairement à sa section, la souplesse du filet étant a priori trop grande. La mise en tension de celui-ci pourrait cependant suffir. On peut aussi remplacer les filets par du grillage plus épais, le coût étant ici moins important vu la faible quantité nécessaire. Il existe des grilles en aluminium fines mais très rigides dans leur plan qu'il serait intéressant d'étudier.



Une autre solution serait de remplacer le lengeh en plâtre par un arc en béton armé préfabriqué. Ce système présente cependant une certaine incohérence structurelle, en plus d'une difficulté de mise en oeuvre et de fabrication (enrobage insuffisant des fers). Je ne pense donc pas son utilisation finalement intéressante par rapport à un véritable arc en béton armé.



Les murs de support de coupôles traditionnels avec leurs assises de briques en arc méritent d'être étudiés de manière approfondie, vu leur très bonne résistance observée. Leur appareillage évite en effet de passer directement sous la coupole de la forme de celle-ci à des assises horizontales, limitant probablement les différences de comportement. Ils n'ont par ailleurs pas de lignes de faiblesse droites, évitant ainsi les propagations de fissure. Ils peuvent aisément être renforcés par un système de filet, toutes les quatre rangées par exemple, dont l'efficacité reste cependant à démontrer.



Les murs devront avoir un chaînage sous leur partie arrondie. Les deux chaînages des deux murs devront être solidarisés. Le problème en cas d'utilisation de tirants en acier est la différence de rigidité de la structure dans les deux directions, et l'absence de résistance à la compression des tirants. Il serait judicieux, malgré l'évident problème esthétique, de remplacer ces tirants par des poutres en béton armé de même caractéristiques. Le carré ainsi formé sera triangulé par des tirants, ou un treillis métallique si ce système s'avère performant. Etant donné la visibilité de ces éléments structurels, l'utilisation du bois pourrait être ici plus justifiée.

Les coupôles elles-mêmes peuvent être renforcées toujours par un système de filet. La difficulté est ici encore accrue pour la liaison entre les arcs et la coupole.

III.3 Programme

III.3.1 Les bureaux avant le tremblement de terre

je rappelle ici brièvement les installations de l'ICHTO à Bam, installées dans la maison Sistani depuis 1994.

- Bureau du secrétariat,
- Bureau de la comptabilité,
- Bureau de la direction,
- Laboratoire,
- Salle de conférences,
- Salle d'archives,
- Sanitaires,
- Salle de stockage,
- Bureau des services techniques,
- Chambre pour les invités.

En outre, ICHTO disposait dans la citadelle de nombreux bâtiments restaurés qui servaient pour le logement des personnalités de passage et pour le stockage de matériel.

III.3.2 Les perspectives de développement du centre de Bam

Comme nous l'avons vu, la Déclaration de Bam valorise cinq grandes directions pour l'avenir, à savoir:

- la conservation de la pleine signification culturelle d'Arg-é Bam et son site.
- La conservation du caractère et du patrimoine de la ville et de son paysage urbain.
- l'intégration de la dimension patrimoniale dans le processus de récupération et de futur développement de Bam.
- la préservation et l'enrichissement de la tradition de l'architecture de terre.
- la protection et la prévention des risques exercés sur le patrimoine architectural en terre dans les régions sismiques.
- le recours à une large coopération à différents niveaux pour réaliser les objectifs de conservation.

De manière plus détaillée, la Déclaration propose entre autres pour le moyen terme (2005-2010) de «mettre en place un système de gestion de l'information ouvert afin d'assurer l'accès à l'information et de prévenir la redondance d'efforts. Ce système devra être pluridisciplinaire». Pour le long terme (2010-2015), il est proposé de «conduire des recherches scientifiques quant au problème de la conservation sur le long terme des architectures de terre d'Arg-é Bam et de faciliter l'intégration et le développement de formations sur l'architecture de terre et la gestion des risques pour les professionnels impliqués dans les activités de conservation, et ce en partenariat avec les institutions de formation, notamment publiques».

Elle soulève par ailleurs le besoin de «documenter et comprendre les performances des matériaux et des structures, en vue de développer des technologies de construction en terre parasismique pour un usage futur à Bam et en Iran».

«L'importance de changer la perception négative de l'architecture vernaculaire par les populations locales sans qui ce type d'architecture sera inévitablement perdue» y est soulignée.

L'organisation nationale du patrimoine et du tourisme iranienne a et aura un rôle majeur à jouer dans l'application de ces propositions. Il est donc nécessaire d'intégrer ces éléments au projet de reconstruction des bureaux pour anticiper le large éventail d'activités qui s'y dérouleront par la suite.

Court terme

La première étape à court terme du projet devra principalement répondre aux besoins immédiats de l'ICHTO en matière de bureaux et de logements. Pour ces besoins, on pourra se référer au programme de leurs anciens bureaux en tenant compte de l'augmentation de leurs activités ainsi que de la venue régulière de personnalités extérieures de la communauté scientifique nationale et internationale.

Le laboratoire d'analyse des matériaux déjà mis en place dans un préfabriqué devra être évidemment intégré au projet.

Il est nécessaire d'anticiper certaines des activités prévues par la Déclaration, pour permettre leur mise en place effective sur le long terme. Ainsi, il faudra rendre possible l'activité de gestion de l'information par la mise en place dès le court terme d'une bibliothèque commençant à centraliser tous les documents, articles et publications ayant trait à la conservation et à la restauration des architectures de terre, ainsi qu'à leur caractère parasismique.

La composante «communication» du travail sur la citadelle devra impérativement commencer dès cette étape. Cette communication sera tournée vers la communauté scientifique d'une part, pour le partage des informations et des expériences, mais aussi vers la population de Bam pour lier autant que possible le travail sur la citadelle au processus de reconstruction de la ville, et préserver la fierté que les Bami éprouvent pour leur patrimoine.

Toutes ces activités devront bien sûr être reliées les unes aux autres.

Moyen terme

Les activités décrites ci-dessus devront être renforcées et développées. Les capacités de travail et d'accueil seront augmentées. Le laboratoire pourra changer d'échelle et, tout en continuant le travail sur les matériaux, s'attaquer aux questions structurales avec des premières installations d'essais et de tests simplifiés. La bibliothèque, dans son évolution pour devenir un véritable centre de ressources, intégrera les moyens nécessaires à la diffusion de l'information, sur supports papier mais aussi par internet dans le souci d'ouverture proné par la déclaration de Bam.

La composante éducation fera son apparition, avec la mise en pratique des relations inter-institutions qui auront pu être établies, notamment avec les universités et centres de formation. Elle permettra des formations, notamment in-situ, d'universitaires, ingénieurs, architectes, scientifiques sur les questions relatives au patrimoine en terre et à l'architecture de terre parasismique. Elle sera aussi orientée vers les professionnels de la restauration et de la construction afin de promouvoir et faciliter l'utilisation de la terre en dehors des cercles scientifiques.

Long terme

Même si l'évolution d'un tel projet est difficile à prévoir, et encore plus à planifier, on peut tracer quelques directions principales qu'il semble intéressant de privilégier. L'objectif serait d'arriver à terme à un "centre de ressource, d'enseignement, de recherche et d'expérimentation dans le domaine de la conservation, de la restauration et de la construction de structures parasismiques en terre". Ainsi, le centre serait organisé autour des trois pôles interconnectés suivant:

- un centre de ressources, centralisant toutes les informations disponibles sur l'architecture de terre parasismique, et plus spécifiquement, produisant les documents nécessaires à la communication et au partage des autres activités du centre. Ces ressources seraient accessibles via une bibliothèque ouverte en partie au public, mais aussi par une base de donnée complète accessible par les réseaux.

- un centre d'enseignement, tourné à la fois vers l'enseignement théorique et l'enseignement pratique. Les partenariats avec les universités et institutions nationales prévoient des formations à l'extérieur, pour faciliter la diffusion du savoir en dehors de Bam. Mais les installations nécessaires à des formations sur le site seront nécessaires.

- un centre de recherche et d'expérimentations, dont les activités porteront sur toutes les échelles de la construction, depuis le comportement des matériaux à l'échelle microscopique jusqu'aux structures, avec notamment le lancement de programmes de recherche sur les arcs, voûtes et coupôles. Ces recherches porteront sur la compréhension du comportement des structures existantes et en conséquence les moyens de les conserver, sur une caractérisation des constructions en terre et de leurs renforcements possibles en vue d'une intégration de ceux-ci dans les normes parasismiques et sur le développement de nouvelles techniques constructives. Les équipements nécessaires à la validation des recherches et à l'expérimentation comprendront notamment du matériel d'analyse par rayons X, des bancs d'essais (compression, cisaillement) une table sismique, ainsi des espaces couverts et à l'air libre permettant la réalisation de prototypes à grande échelle. Enfin, un espace de recherche sur les modèles informatisés de structures, avec des postes de travail dédiés et un centre de calcul, permettrait de valider différents modèles numériques existants, ou d'en chercher d'autre, pour tenter de prévoir le comportement des structures.

- un centre de production de matériaux, qui permettra d'approvisionner le centre de recherche et surtout les travaux de rénovation qui seront entrepris. Son intégration au projet permettra d'assurer entre autres un suivi de la qualité des matériaux ainsi que des tests et validations des hypothèses de recherche à grande échelle. Il sera un lieu privilégié de formation professionnelle pour transmettre aux constructeurs la qualification nécessaire à la production de matériaux de qualité.

III.3.3 Programme à court terme détaillé

Les propositions présentées ici quant aux développements possibles du projet prennent la forme de deux scénarios, le premier étant un scénario "raisonnable", le second un scénario "idéal". L'évolution vers l'un ou l'autre ou de l'un à l'autre dépendra évidemment des deux facteurs que sont le temps et les moyens. Le nombre d'institutions et d'enjeux entrant en ligne de compte, ainsi que les incertitudes du projet de conservation/restauration rendent très difficile toute prévision. On peut cependant se fonder sur la déclaration de Bam pour définir les notions de moyen et long terme, à savoir les horizons 2010 et 2015.

Les surfaces données ici sont fondées sur l'utilisation des modules décrits au paragraphe III.2, chacun d'entre eux faisant 17 m². Ils peuvent être combinés modules doubles (34 m²), triples (51 m²) ou quadruples (68 m²).

Travailler à Bam:

- Sanitaires, soit 34 m².
- Bureaux de gestion interne: Sont regroupés ici la comptabilité et le secrétariat, c'est à dire aujourd'hui un chef comptable et deux secrétaires, soit deux bureaux de 17 m².
- Locaux techniques, 17 m².
- Stockage: une salle de 17 m² pour entreposer le matériel.
- Bureau du directeur dans lequel il doit pouvoir travailler mais aussi avoir des réunions "privées", soit un bureau de 34 m², éventuellement divisible en deux (bureau et salle de réunion).
- Laboratoire qui se compose:
 - du laboratoire lui-même, qui doit permettre de confortablement pratiquer toutes les expériences d'analyse des terres, à savoir un espace sédimentométrie, un espace granulométrie, un espace bleu de méthylène, un espace retrait, un espace pour les tests de résistance, un espace pour un bureau soit 51 m².
 - d'une "échantillothèque" qui permettra de stocker les échantillons des terre étudiées pour d'éventuelles études complémentaires, soit une salle de 17 m²
 - d'un entrepôt pour stocker les outils et matériaux de 17m²,
 - d'un espace semi-couvert pour la réalisations de murets de test ou d'autres structures de 50 m² dont 17 m² couverts.
- Deux salles de travail qui doivent permettre à 15 personnes de travailler confortablement, soit deux salles de 34 m².
- Deux salles de réunion, soit deux salles de 17 m².
- Salle de conférence, en amphithéâtre, pouvant accueillir 100 personnes.
- Une bibliothèque avec un espace de consultation soit une salle de 51m².
- Une salle d'exposition permettant au public de découvrir le travail fait et les résultats obtenus, sur 51 m².
- Un accueil de 17 m² (avec espace d'attente) qui peut servir de secrétariat en même temps.

Vivre à Bam:

- 20 chambres de 17 m² pour les employés n'habitant pas Bam (12 m² + sanitaires 5 m²),
- 5 studios pour les personnalités de passage (29 m² + 5 m²)
- cuisines, soit une cuisine de 34 m² avec un espace extérieur semi-couvert de 20 m², et une salle de stockage de 17 m²
- Réfectoire de 51 m² qui fait aussi salle de détente commune et d'accueil.

III.4 Aperçu du projet architectural

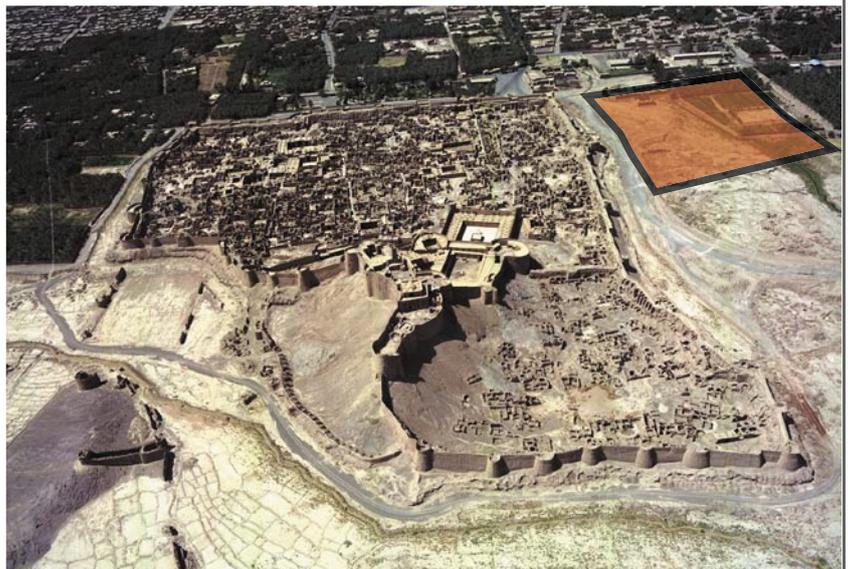
L'objectif est d'aboutir à la définition d'un ensemble de bâtiments répondant au programme. Ces différents bâtiments seront prétexte à des illustrations des différents principes constructifs retenus. Je ne présente ici que les grandes lignes de ce projet, qui sera développé plus complètement lors de la soutenance. Certains aspects sont encore susceptibles d'être modifiés.

III.4.1 Présentation du site

Le choix du site reste un point délicat de ce projet. Les intentions de l'ICHTO sont en effet de placer les bureaux le plus près possible de la citadelle. Ils ont pour cela choisi le terrain sur lequel se trouvait avant le séisme la résidence du responsable du site, le docteur Tayari. Ce terrain est contigu à celui sur lequel sont aujourd'hui implantés les logements provisoires du personnel. L'acquisition du terrain est en cours mais c'est apparemment un processus long et les limites de la surface prévues pour le projet ne sont pas encore définies.

Cependant, ce choix est contreversé. En effet, la proximité directe et le lien visuel avec la citadelle en font un lieu dont l'usage est délicat, notamment vis-à-vis du respect de la nomination au Patrimoine Mondial. Par ailleurs, la présence très probable de vestiges archéologiques remet sérieusement en cause la possibilité d'une quelconque construction, surtout de la part de l'ICHTO, qui est responsable de la conservation du patrimoine de Bam et de tout l'Iran. En conséquence de cela, il paraît finalement peu probable (et tout simplement impossible pour certains) que cette décision se finalise. Il resterait alors à ICHTO à chercher un autre site d'implantation, le plus proche possible de la citadelle, et ayant les possibilités d'extension pour le vaste projet visé à long terme, à moins de se rabattre sur un morcellement du projet sur différents sites, ce qui serait nuisible à son approche intégrée et pluridisciplinaire. J'ai néanmoins décidé de conserver ce site dans le cadre de ce projet de fin d'étude n'ayant aucune alternative qui ne serait arbitraire. Par ailleurs, ce site présente un intérêt certain, et il a dû être choisi pour cette raison.

On voit ici en orange le site sur une photographie aérienne avant le tremblement de terre.



Le terrain est tout contre la citadelle. Cependant, si, depuis celui-ci, la présence visuelle de l'Arg est impressionnante, les bâtiments éventuellement construits sur le terrain seraient assez en retrait. En effet, lorsque l'on arrive à l'Arg du centre-ville (en bas sur la photo aérienne), le terrain est sur la gauche, et caché par des constructions (peut-être détruites depuis). La présence immédiate de la porte (qui reste impressionnante malgré sa destruction) permet de guider le visiteur sans aucun doute vers l'Arg.

Une fois dans l'enceinte, il n'y a que des remparts ouest et du château que l'on pourrait apercevoir les nouvelles constructions. Celles-ci seraient d'ailleurs probablement entourées de dattiers, comme toutes les constructions de la palmeraie, ce qui rendrait leur perception encore plus difficile.

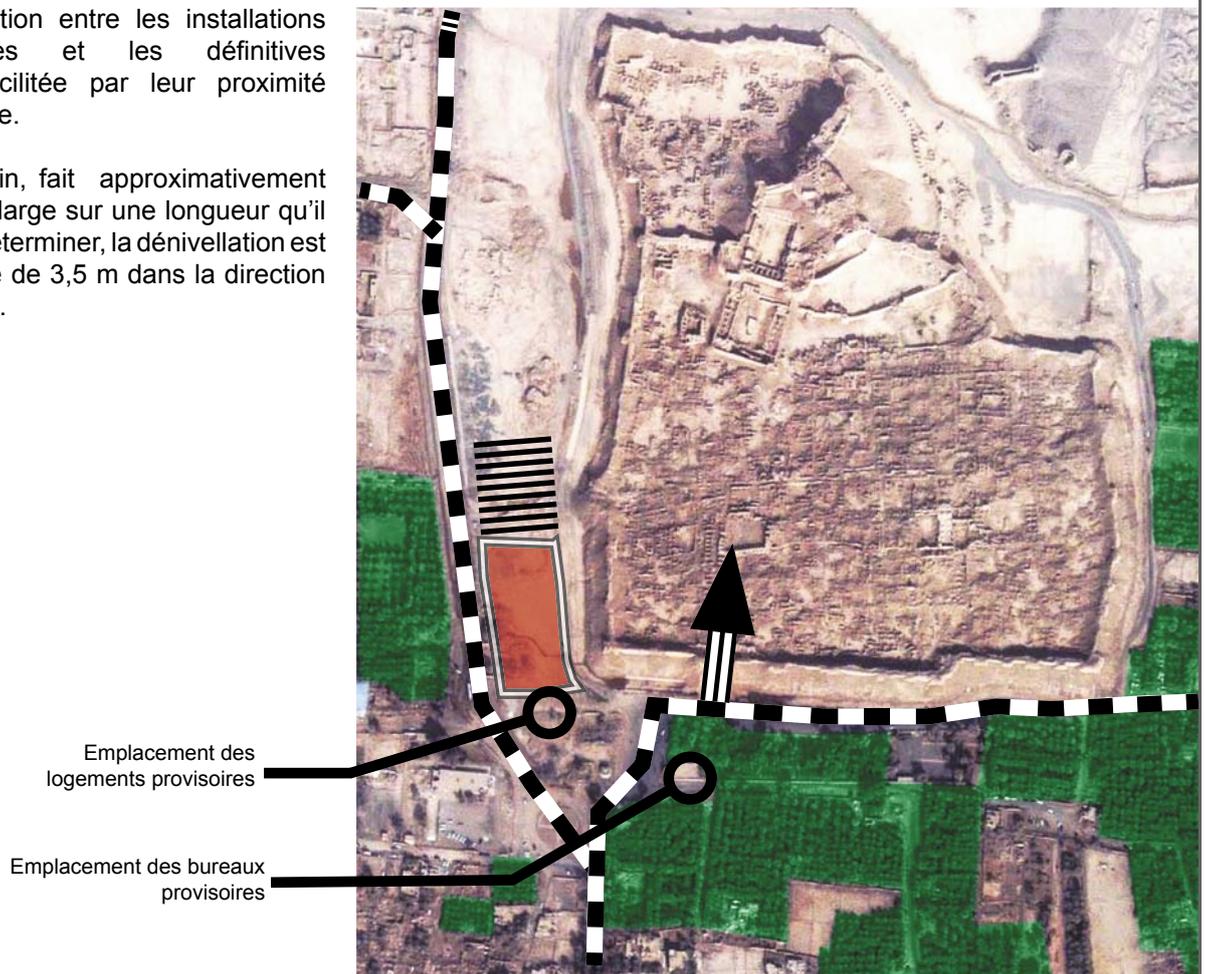
Ainsi, l'ICHTO pourrait avoir une implantation à proximité immédiate, accessible directement depuis la citadelle, quoique gardant un certain effacement indispensable. Il va sans dire que la vraie question n'est pas de savoir si les bureaux de l'ICHTO dénatureraient le site visuellement, ce qui est facile à éviter avec une certaine attention. Il s'agit plus d'une question de principe sur les implications de l'autorisation de construire un bâtiment ex-nihilo aussi proche de l'Arg.

Par ailleurs, le terrain bénéficie de deux accès possibles, à l'ouest sur toute sa longueur depuis la route, et au sud en lien direct avec l'entrée de la citadelle. Cela permettrait ainsi d'avoir un accès plus orienté vers le public au sud, et un pour le personnel, et surtout le matériel, à l'ouest.



La transition entre les installations provisoires et les définitives serait facilitée par leur proximité immédiate.

Le terrain, fait approximativement 80 m de large sur une longueur qu'il reste à déterminer, la dénivellation est de l'ordre de 3,5 m dans la direction ouest-est.



III.4.2 Organisation spatiale

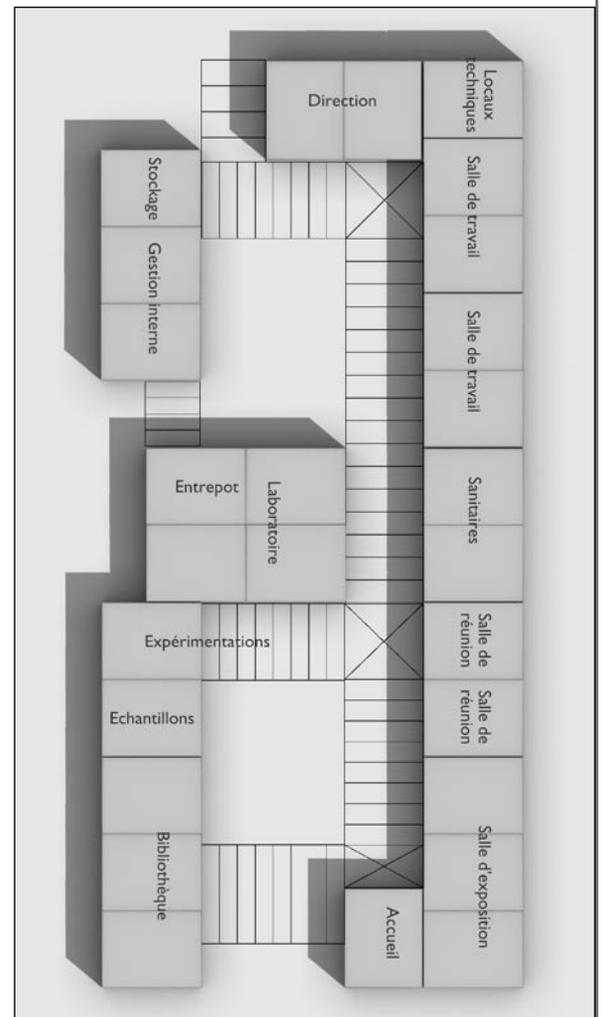
Un premier classement des fonctions du programme peut se faire en fonction du caractère public/privé de celles-ci. Cette séparation se retrouve en effet dans la plupart des constructions traditionnelles de l'Iran (cf paragraphe II.2.2), et influe encore énormément sur la conception des logements aujourd'hui.

Dans le cadre du programme, la notion d'ouverture sur l'extérieur prend de l'importance, notamment au vu du rôle de communication souligné par la déclaration de Bam. Les fonctions du programme sont donc classées selon leur ouverture sur l'extérieur. Les salles à fonction "ouvertes" seront celles les plus proches de l'entrée, et l'on progressera des fonctions les plus ouvertes aux fonctions les plus internes à l'ICHTO.

La distribution des espaces se fera par des cours fermées, en continuité avec l'organisation spatiale de la plupart des constructions iraniennes. Ces cours auront par ailleurs un jardin dont le rôle climatique et symbolique a été décrit en II.2.2. L'importance de cette organisation spatiale pour les iraniens peut être appréhendée en observant que même les logements provisoires actuels en préfabriqués sont organisés autour d'une cour plantée de quatre dattiers.

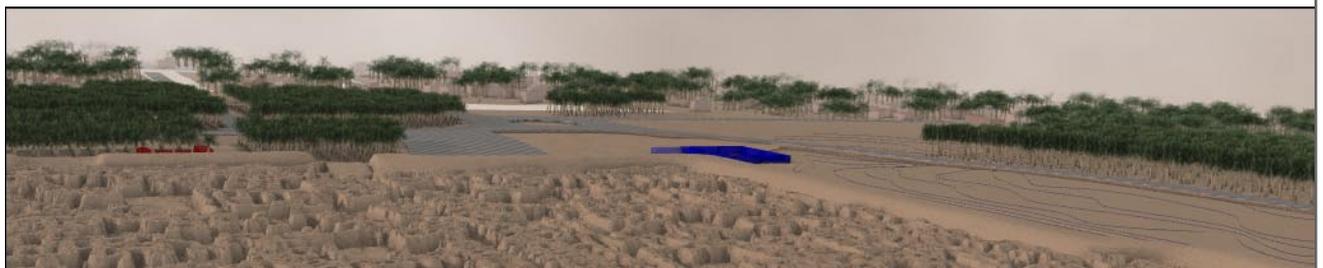
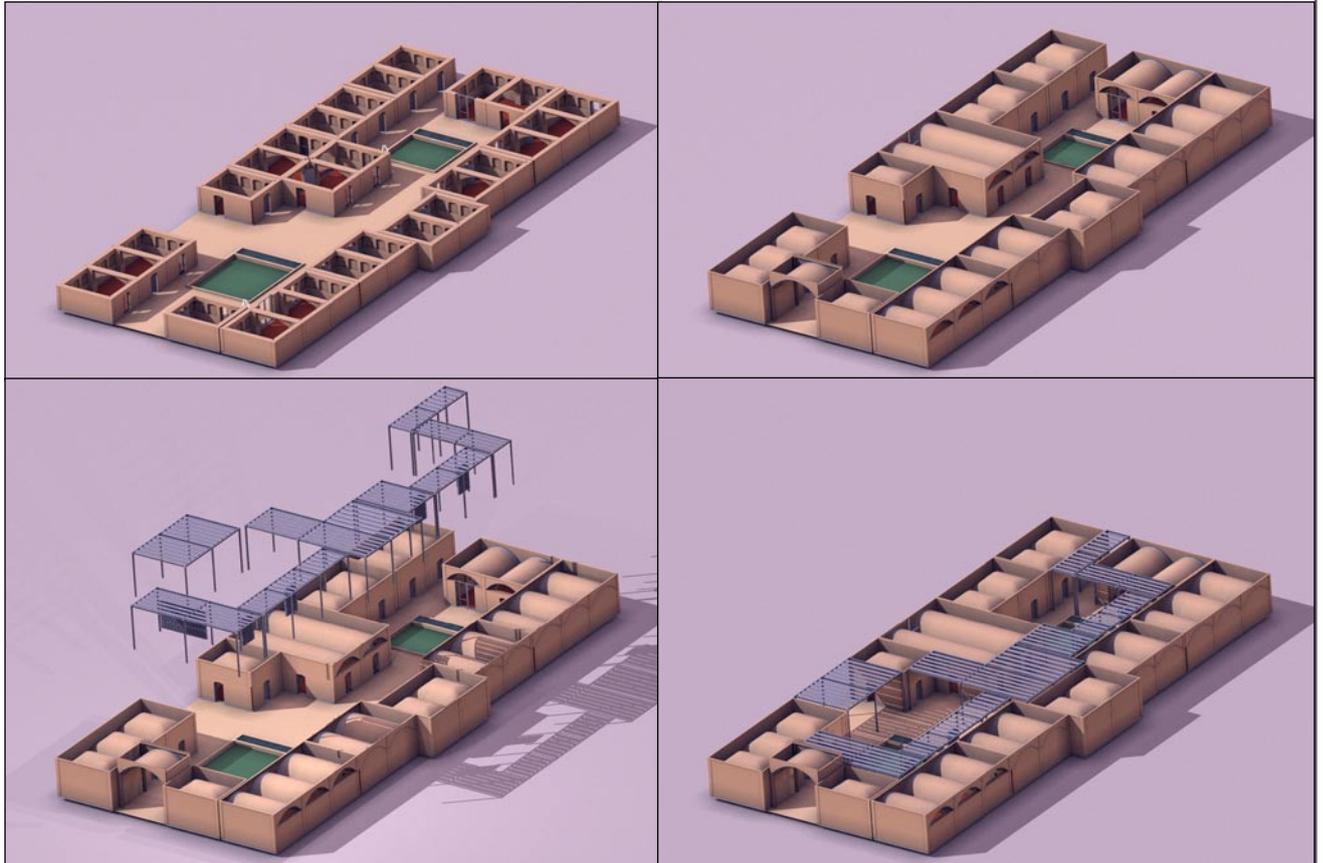


L'orientation générale des bâtiments sera perpendiculaire à l'orientation traditionnelle. En effet, l'usage saisonnier des pièces n'est pas envisageable, et on ne peut donc avoir des pièces complètement ouvertes au sud, et d'autres ouvertes au nord. On privilégiera donc un axe nord-sud avec des façades au sud les plus petites possible. Les ouvertures au sud et à l'ouest devront être protégées du soleil par une toiture brise-soleil. Celle-ci permettra en outre la circulation à l'abri de la pluie. Cette galerie devra cependant être la plus ouverte possible sur le jardin.



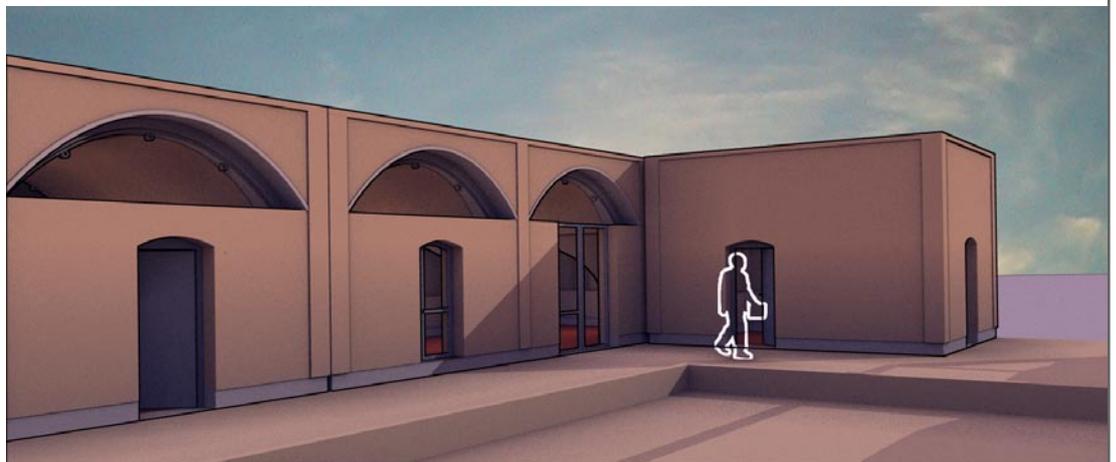
III.4.3 Premières esquisses

Ces premières images ne sont incluses ici qu'à titre indicatif, en attendant la soutenance. Elles donnent cependant une certaine idée de la forme d'ensemble et de certains détails.



Les bords de voûtes sont ici surmontés d'un acrotère, qui pourrait être fait de matériaux légers (torchis par exemple) ou d'adobes fixées à l'aide de filet pour limiter les risques de chute. On a ainsi des formes et des espaces plus proches de ce que l'on voit à Bam.

La circulation est faite en structure métallique indépendante de la maçonnerie. Elle permet donc de protéger de la pluie et surtout du soleil, tout en gardant l'ouverture sur le jardin. Des pare-soleil servent également à limiter la vue de l'extérieur à l'entrée de la cour, mais sans complètement fermer l'espace.



conclusion

La ville de Bam a été en majeure partie détruite par un tremblement de terre le 26 décembre 2003. Encore aujourd'hui, et pour très longtemps, c'est toute une ville qui est à reconstruire, c'est à dire des bâtiments, mais aussi une économie et surtout une société.

Cette ville possède l'un des joyaux du patrimoine mondial, un des plus vastes exemples des possibilités du matériau terre pour la construction, d'habitations, mais aussi d'édifices religieux, monumentaux et militaires. La citadelle d'Arg-e Bam et ses sites associés ont d'ailleurs été nominés sur la liste du Patrimoine Mondial de l'UNESCO. Mais Bam ne se limite pas à sa citadelle, et ce sont aussi ses palmeraies, ses habitations des plus modestes aux plus grandioses, son système de qanats et son paysage qui en faisaient son identité.

La construction en terre a toujours fait partie de l'histoire de la ville, mais son intégration au processus de reconstruction est remise en cause par une image négative et des normes de construction inadaptées. Elle s'inscrit cependant parfaitement dans les trois composantes qu'il est indispensable de prendre en compte pour une reconstruction viable et durable, à savoir la composante technique, la composante culturelle et la composante socio-économique.

D'un point de vue technique, la terre est certes intrinsèquement plus faible que les matériaux dits modernes, mais sa mise en oeuvre correcte permet d'obtenir des bâtiments de taille modeste résistant aux séismes. Ceci est démontré par les nombreux exemples que l'on rencontre dans les cultures constructives des régions exposées au risque sismique. Par ailleurs, des programmes de recherche, des projets expérimentaux et des programmes de construction l'ont confirmé et ont prouvé que la terre pouvait être adaptée aux contraintes techniques et économiques actuelles.

D'un point de vue culturel, l'adéquation de la terre avec l'identité de Bam est évidente, celle-ci ayant été le matériau de construction presque exclusif des Bami pendant probablement plus de deux millénaires. Cependant, le matériau n'est évidemment pas le seul vecteur d'une identité, il s'agit de l'utiliser en harmonie avec son contexte, notamment climatique, et en respectant les modes de vie des populations.

D'un point de vue socio-économique, la construction en terre favorise l'utilisation de la main d'oeuvre par rapport à l'énergie. Elle est ainsi génératrice d'emplois. Son caractère local, de la production à l'utilisation, permet de garder les richesses dans l'économie de la ville. Son faible coût, si ce n'est de construction en tout cas d'utilisation, permet aux populations de limiter les dépenses de reconstruction sur le long terme. Sa mise en oeuvre demandant un minimum de technologie, son appropriation et son utilisation par les populations elles-mêmes est possible, que ce soit pour permettre aux personnes ne disposant pas de l'aide gouvernementale de se construire un logement, ou pour les agrandissement futurs. Cette aide gouvernementale aura d'ailleurs un terme, et les entreprises nationales impliquées dans la reconstruction quitteront alors Bam. Cette appropriation permettra alors à la reconstruction d'y survivre et de continuer sur le long terme.

Dans ce cadre, le projet de construction d'une base-vie pour l'ICHTO (organisation nationale du patrimoine et du tourisme) est prétexte à l'exploration des possibilités de la construction en terre pour la reconstruction de Bam. Ce projet se présente sous forme de modules interchangeable. Chaque module répond plus ou moins aux trois composantes décrites ci-dessus, technique, culturelle et socio-économique. Les propositions concernent des prototypes relativement simples dont la plupart des techniques ont déjà été expérimentées, mais aussi des études et des pistes de recherche sur les voûtes et coupes. Ce type de structures devrait en effet pouvoir être utilisable en contexte sismique, mais nécessitent d'être validées par des programmes de recherche et d'essais.

Le projet lui-même, répondant dans une première étape aux besoins immédiats de l'ICHTO, a pour ambition de devenir à long terme un "centre de ressource, d'enseignement, de recherche et d'expérimentation dans le domaine de la conservation, de la restauration et de la construction de structures parasismiques en terre", pour répondre notamment aux recommandations de la Déclaration de Bam. Ses possibilités d'évolution permettront donc d'intégrer les activités de recherche, d'enseignement et de communication.

Ce centre devra permettre de pleinement lier la ville nouvelle et son patrimoine, la reconstruction et la sauvegarde de l'identité de Bam, la compréhension des cultures constructives passées et la recherche de nouvelles techniques. Cette approche globale pourrait être un exemple au niveau mondial, exemple qui participerait à la reconnaissance des possibilités du matériau terre en termes technique, culturel et socio-économique.

- Architecture de terre : arcs, voûtes et coupes / Ecole d'Architecture de Grenoble, CRATerre / Grenoble: EAG, 1987
- Art de l'islam (I') / Luca Mozzati / Menges / 2003
- Bam, sentinelle de sable / Le Normand Bruno / Paris : Gallimard, 2004
- Buena tierra, apuntes para el diseño y construcción con adobe, consideraciones sismorresistentes / Urbano Tejada Schmidt / CIDAP, Lima, Peru, 2001
- Construire avec le peuple / Fathy Hassan / Paris: Sindbad, 1970
- Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth / Gernot Minke / Eschborn: Gate-Basin, 2001
- Construire parasismique / Milan Zacek / Marseille: Editions Parenthèses, 1996
- Earthquake resistant construction of low-cost adobe housing. Final Report and Annexes to Final Report / A.W.M. Kok, G. Sovero / Delft: CICAT, 1996
- Edificación con Tierra Armada, Diseño, cálculo y construcción con el sistema CET/ Jorge Luis de Olarte Tristan, Evelin Guzman Shigetomi, Madrid 1993
- Eléments d'architecture adaptés au climat désertique en pays islamiques / Pradeau Daniel, Moine Philippe / Bordeaux : UPA de Bordeaux, 1978
- Espace persan: Architecture traditionnelle en Iran / Khansari Mehdi, Yavari Minouch / Liège: P. Mardaga, 1986
- Getty seismic adobe project, report of third year activities. Shaking table tests of large scale adobe structures / W.S. Ginell, E.L. Tolles, P. Gavrilovic, L. Kretevska, V. Sendova, L. Taskov / Los Angeles: GCI, 2001
- Guide de construction parasismique. Adobe / Wilfredo Carazas Aedo / Villefontaine: CRATerre, 2002
- Guidelines for building measures after disasters and conflicts / Horst Valentin Kreutner, Birgit Kundermann, Kiran Mukerji. München : GTZ, 2003
- Indian Standard, Improving earthquake resistance of earthen buildings - Guidelines / New Dehli: Bureau of Indian Standards, 1993
- Indigenous Building Techniques of Peru and their potential for improvement to better withstand earthquakes / Volker Hartkopf / Washington: Agency for international development, 1981
- International recommendations for design and erection of unreinforced and reinforced masonry structures / Haseltine B.A., Rotterdam: CIB, 1987
- Introduction à la construction parasismique en terre / Wilfredo Carazas Aedo / Grenoble, 2000
- Introduction à l'habitat rural en Iran, typologie et facteurs influents de l'habitat rural, proposition pour un inventaire / Saidi-Sharouz Mina / Grenoble : EAG, 1987
- Local seismic cultures and earthquake vulnerability reduction in traditional masonry buildings / Proceedings of the 12th intensive course of the European university centre for cultural heritage, Ravello, Italy, December 11-17 2002

- Low-cost construction resistant to earthquakes and hurricanes / New York: United Nations, 1975
- Maisons d'Ispahan / Diba Darab, Revault Philippe, Santelli Serge / Paris : Maisonneuve et Larose, 2001
- Persian Architecture (introducing) / Arthur Upham Pope / Ashiya: Asia Institute Books 1976
- Principles and Regulation of Design and Construction of Masonry Buildings / H.Shakib, P.Ghatee, M.H. Majedi Ardakani, I.R.Housing Foundation, The Interior Ministry
- Programma de reconstruccion de viviendas en El Salvador. Modulos sismoresistentes en tierra: Adobe y bahareque Ceren / FUNDASAL, Misereor, CRATerre-EAG. San Salvador, 2001 – CD avec deux vidéos
- Recherche et propositions pour une unité d'habitation en terre en Iran / Saidi-Sharouz Mina / Grenoble : EAG, 1987
- Seismic strength of adobe masonry / Vargas, J. ; Bariola, J. ; Blondet, M. ; Mehta, P.K. / Catholic University of Peru, 1983
- Seismic Stabilization of historic adobe structures. Final report of the Getty seismic adobe project / E Leroy Tolles, Edna E. Kimbro, Frederick A. Webster, William S. Ginell. Los Angeles: The Getty conservation institute. 2000
- Survey of damage to historic adobe buildings after the January 1994 Northridge earthquake / Tolles, E. Leroy; Webster, Frederick A.; Crosby, Anthony; Kimbro, Edna E. , Los Angeles: Getty Conservation Institute, 1996
- Technical building standard NTE E.080 ADOBE / Antonio Blanco Blasco, Jose Luis Amado Travezaño et al. / Lima, Peru 2000
- Technical Manual on Reinforcing Adobe Housing in the Coastal and Mountain Zones of Peru / Zegarra Luis, San Bartolomé Angel, Quiun Daniel, Giesecke Alberto, Schmitter Jorg-Peter,
- Traité de construction en terre / CRATerre, Houben Hugo, Guillaud Hubert, Dayre Michel, Bard Pierre-Yves, Perrier Guy, Dath Fabienne / Marseille : Ed. Parenthèses, 1995

Articles et rapports

3D nonlinear response simulations of Bam telephone center RC building to the 2003 Bam Earthquake considering the effect of masonry infill walls / H. Mostafaei, T. Kabeyasawa/ Tokyo : Earthquake Research Institute, 2004

A history of reinforced masonry construction designed to resist earthquakes: 1755-1907 / Tobriner, S. / In: Earthquake Spectra, Vol. 1, N°1, EERI, November 1984

Arg-é Bam ICHTO support mission / Matthieu Dupont de Dinechin, David Gadreau / Grenoble: CRATerre-EAG 2004

Bam post-earthquake inspection and seismic vulnerability of buildings in Iran / H. Mostafaei, T. Kabeyasawa/ Tokyo : Earthquake Research Institute, 2004

Bricks, mortar and earthquake / Langenbach Randolph / In: APT Bulletin, n°31, 1989, p.3-4

Engineering Geology and Geotechnical Aspects of Bam Earthquake / Kambod Amini Hosseini, Mohammad Reza MahdaviFar, Mohammad Keshavarz Bakhshayesh, Masomeh Rakhshandeh, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Preliminary Report, January 2004

Finding alternatives to persistent organic pollutants (POPs) for termite management / UNEP, 2000

Preliminary observations on the Bam earthquake of December 26, 2003 / In: EERI Special Earthquake Report, April 2004

Seismic behavior of blocky masonry structures / Azevedo, J. ; Sincaian, G., Lemos, J.V. / In: Earthquake spectra, Vol. 16, N°2, EERI, may 2000

Some thoughts on «adobe codes» / Fred Webster / publié initialement dans Adobe Codes / Bosque, 1995

Unreinforced Masonry Bearing Wall Structures / Erdik, M. and Gulkan, P. / In: Earthquake Spectra, Supplement to Vol.9, Erzincan, Turkey Earthquake of March 13, 1992: Reconnaissance Report, EERI, July 1993

UNESCO, ICHO, ICOMOS Bam Declaration and Recommendations, Arg-e Bam shall always remain alive / Téhéran 2004

Using industrial material for the construction of safe adobe houses in seismic areas / M. Blondet, D. Torrealva, G. Villa Garcia, F. Ginocchio, I. Madueño /Lima: Pontifical Universidad Catolica de Peru

Séminaires et conférences

Adobe: international symposium and training workshop on the conservation of adobe, Lima - Cuzco, Peru, 10-22 September 1983, Final report and major papers, 1983

Earthen buildings in seismic areas. Proceedings of the international workshop held at the university of New Mexico, Albuquerque, may 24-28, 1981, National Science Foundation, Washington, 1981

Proceedings of the ninth world conference on earthquake engineering, Tokyo/Kyoto, Japan, August 1988

Proceedings of the 10th European conference on earthquake engineering, Vienna, Austria, 28 august, 2 September 1994, ed. A A Balkema, Rotterdam, 1995

Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6 2004

présentation du sujet	1
Contexte : la ville de Bam	2
Présentation de la ville	2
“L’identité de Bam” L’Arg et les Bami	3
Le tremblement de terre	4
La reconstruction.....	5
Demande	6
Les bureaux avant le tremblement de terre	6
La base-vie actuelle	6
Contraintes	7
La ville de Bam, risque sismique et reconstruction	7
La proximité de la citadelle.....	8
Chapitre 1 - problématique: la place de la construction en terre dans le processus de reconstruction de la ville de bam	9
I.1 Composante technique : la construction en terre et le risque sismique	10
I.1.1 Le matériau n’est pas le responsable	10
I.1.2 Les normes parasismiques: application aux principes constructifs traditionnels	11
I.1.3 Les enjeux derrière les normes.....	13
I.2 Composante culturelle: sauvegarder l’identité de Bam	14
I.3 Composante Socio-économique: reconstruire la société	16
I.3.1 Comment et pour qui reconstruire ? Enjeux socio-économiques.....	16
I.3.2 Un développement durable	17
I.3.3 La (re)création d’une filière de construction en terre.....	18
Chapitre 2 - construction parasismique dans la continuité des cultures constructives à Bam	19
II.1 Principes de construction parasismique	20
II.1.1 Effets des séismes sur les constructions	20
II.1.2 Mécanismes de résistance des constructions aux séismes.....	22
II.1.3 Adaptation au contexte.....	27
II.1.3 Approche globale de la conception parasismique.....	29
II.2 Les cultures constructives de Bam	30
II.2.1 Principes constructifs	30
II.2.2 Principes architecturaux	55
II.2.3 Les cultures constructives face aux processus de dégradation	60
II.2.4 Les cultures constructives de Bam face aux séismes.....	64
II.2.5 Etat des lieux de la construction en terre aujourd’hui à Bam	68
II.2.6 Les constructions dites «standard».....	73
II.3 La construction en terre parasismique à travers le monde	78
II.3.1 Solutions vernaculaires	79
II.3.2 Programmes de recherche.....	83
II.3.3 Solutions expérimentales	88
II.3.4 Solutions modernes éprouvées.....	92
II.4 Conclusions	95

Chapitre 3 - le projet.....	96
III.1 Les composantes du projet	97
III.1.1 Composante technique	98
III.1.2 Composante culturelle	99
III.1.3 Composante socio-économique.....	99
III.2 Principes constructifs retenus	100
III.2.1 Matériaux	100
III.2.2 Systèmes structurels	102
III.2.3 Pistes de recherche	125
III.3 Programme	128
III.3.1 Les bureaux avant le tremblement de terre	128
III.3.2 Les perspectives de développement du centre de Bam	128
III.3.3 Programme à court terme détaillé	131
III.4 Aperçu du projet architectural	132
III.4.1 Présentation du site	132
III.4.2 Organisation spatiale	134
III.4.3 Premières esquisses	135
Conclusion.....	137
Bibliographie.....	138