



PROTOTYPE D'HABITAT PARASISMIQUE
Batagram district, Pakistan
octobre 2006

conception et présentation du prototype:
Olivier Boucheron, architecte d.p.l.g.
nelobo@yahoo.fr

Ce travail de conception d'un prototype d'habitat individuel parasismique utilisant la technologie des murs en gabions (ou Murs en Pierres Confinées, MPC) s'appuie sur les conclusions et les recommandations de Guy Besacier, ingénieur spécialiste du parasismique qui a effectué une mission d'évaluation pour la Croix Rouge Française en novembre 2005, et sur les différents rapports et remarques des membres de l'équipe d'A&D au Pakistan. Il s'agit là d'une première étape qui doit conduire à la réalisation d'un prototype. Avant cela, le dimensionnement des éléments finis devrait être effectué prochainement par un bureau d'ingénierie.

Il nous a semblé essentiel de ne pas limiter notre recherche à l'aspect purement technique du prototype (et particulièrement à ses performances en termes de résistance parasismique), mais d'envisager son développement au travers de l'économie même du projet (choix des matériaux et de leur filière de production existante ou à créer) et des réalités du contexte socioculturel particulier du nord du Pakistan.

C'est pour cette raison, que, tout d'abord, la partie habitation du prototype (en soustrayant l'espace de la cour) se développe sur deux niveaux et environ 75 m² pour huit personnes, alors que les recommandations des programmes de reconstruction déconseillent les réalisations de plusieurs niveaux et recommande un ratio de moins de 4 m² par habitant pour les nouvelles constructions.

La conception de ce prototype est ensuite une sorte de synthèse de plusieurs intentions et pistes de réflexion pour envisager la reconstruction de l'habitat des plus démunis dans le district de Batagram, mais aussi pour en envisager l'amélioration.

Le prototype n'est pas une image figée de ce que l'on doit faire mais un condensé de possibilités ; que cela soit aussi bien en termes de confort et d'espace, que de la mise en œuvre de technologies alternatives et innovantes. Le principe de maison sur cour est plus adapté aux habitats regroupés de vallées, mais comme nous l'expliquons plus loin, dans un contexte montagneux la toiture-terrasse peut se substituer à la cour.

C'est pour cette raison que nous présentons plusieurs options techniques et que l'agencement des espaces intérieurs (au moyen de cloisons souples et amovibles) n'est pas définitif et peut être facilement adapté aux besoins des habitants.

Un soin particulier a été porté à l'étude des techniques traditionnelles, non pas pour reproduire ce que certains habitants du district de Batagram savent encore faire (même si la connaissance des savoirs faire traditionnels se dilue avec le temps, ce qui augmente le risque de malfaçons et par conséquent le risque d'effondrement des structures), mais pour y déceler les potentialités technologiques et les possibilités d'hybridations constructives.

C'est en réinterprétant certaines cultures spatiales et techniques de la région et en ne sous-estimant pas la faculté des Pakistanais à intégrer, reproduire et améliorer de nouveaux procédés de mise en œuvre, que nous envisageons la possibilité de la régénération de ses architectures traditionnelles dans le cadre de ce programme de reconstruction.

I. Avantages du gabion

G. Besacier a identifié plusieurs raisons qui peuvent justifier l'usage des gabions pour une reconstruction post-sismique dans la zone sinistrée de Batagram :

- La présence de quantité importante de la matière première (la pierre) nécessaire à la fabrication des gabions sur les sites de reconstruction. La pierre de remplissage est en effet disponible en zone montagneuse (notamment du schiste) sous forme de blocs bruts extraits des carrières ou dans les vallées, sous forme de galets, ce qui rend son emploi peu onéreux sur les sites concernés. Il est cependant important de signaler qu'une partie du minéral exploité est déjà utilisée. La réutilisation des blocs de pierre, issus des maisons détruites, pourrait constituer une alternative à l'exploitation.
- Le recours à une connaissance locale et empirique des techniques de construction en pierres sèches et sa réactualisation peuvent contribuer à l'invention de techniques constructives mixtes, innovantes et économiques.
- Un mortier de liaison à base de ciment, dont le coût peut s'avérer élevé, n'est pas utilisé dans la réalisation des murs en gabions. Le chantier est ainsi "sec", il peut donc se dérouler par tous les temps. Il est également plus facile à diriger et gérer.
- La mise en œuvre facile des gabions, par empilement, ne nécessite pas de compétence particulière et permet un montage rapide des structures.
- Les fondations des murs peuvent être aussi réalisées en gabions.
- La présence de quelques expérimentations locales de la technique du gabion pour des ouvrages de soutènement.
- Un apparement faible surcoût (non estimé pour l'instant) du métal pour la fabrication des cages en grillage a été constaté sur place.
- La fabrication des cages par pliages et assemblages ne nécessite pas l'apport d'énergie électrique.
- La possibilité d'impliquer les bénéficiaires dans le processus de fabrications des éléments grillagés, notamment pour le montage des cages par ligatures (la précieuse connaissance de l'art de la vannerie par certains hommes pourrait ainsi permettre leur implication dans le projet). Ce processus de fabrication peut-être également semi-industriel et ainsi permettre un appui à la relance économique du tissu des petites entreprises locales.

II. Description du prototype

Le climat du district de Batagram (300 m d'altitude pour la ville elle-même) est caractérisé par des températures élevées durant huit mois de l'année, mais une saison froide, à très froide selon l'altitude (ponctuellement supérieure à 2000 m), de novembre à fin février. Entre juin et septembre, la région subit les fortes précipitations de la mousson du sud-ouest, alors que le reste de l'année, le climat est sec. Les précipitations saisonnières n'étant pas suffisantes pour la culture du riz, les rizières en terrasse sont irriguées

Les villages et les maisons sont traditionnellement situés sur des terres qui ne peuvent pas être cultivées.

L'ensemble habitation-cour du prototype est un rectangle de 6m sur 14 m, soit environ 75 m² pour l'habitation elle-même.

- **Fondations :**

Les tranchées de fondations sont creusées sur environ 80 cm. Les fondations des murs en gabions de la maison et de ceux qui délimitent la cour sont également constituées de gabions de 50*80*100cm qui, connectés entre eux, forment une semelle périphérique continue. Des blocs de 25*50*100cm effectuent la liaison entre la semelle et le mur. Des semelles filantes, connectées aux fondations périphériques, fondent également les refends en pans de bois du rez-de-chaussée. Seul le pan de bois de la véranda, qui reprend le port à faux du plancher de l'étage, est simplement posé au sol, encastré dans les murs de la cour.

La pente du sol au pied des murs, évite que l'eau stagne à cet endroit et affaiblisse les fondations. Un caniveau périphérique permet son évacuation.

- **Murs en gabions :**

L'usage de gabions permet de créer une sorte de "boîte rigide", parfaitement contreventée, capable de supporter le poids d'un étage et d'absorber l'énergie des secousses sismiques. Deux options sont envisagées pour la fabrication et la mise en œuvre des cages en grillage.

Pour la première option (v.1 sur les plans), des cages de 50*50*100cm sont fabriquées en grillage orthogonal de 4*4cm, constitué de fil de 0,2cm en acier galvanisé pour assurer une meilleure résistance des cages à l'oxydation (le dimensionnement final des matériaux utilisés sera effectué lors

de l'étude de résistance des matériaux). Le patron des cages est réalisé à plat, puis replié et ligaturé aux angles. La cage est mise en place vide. Elle est assemblée sur deux côtés et par ligature aux cages déjà en place. Elle est ensuite remplie de lits de pierres (du schiste dans cette région), selon le même principe que la technologie locale des murs en pierres sèches. Ensuite, elle est refermée et les cages suivantes sont assemblées à ses deux côtés laissés libres. Les joints des cages sont alternés (assise réglée) et des chaînages d'angle sont réalisés par l'alternance des blocs assemblés perpendiculairement (harpe en besace).

Pour la deuxième option (v.2 sur les plans), les cages mesurent 50*50 par la longueur maximale possible (jusqu'à une baie ou un angle). Une seule cage, réalisée sur le même modèle que dans l'option 1, confine un lit de pierre de 50cm de hauteur. Il y a moins de joints de liaison, la structure est donc plus homogène. Pour renforcer davantage cette structure, on pourrait envisager d'armer les gabions en disposant à l'intérieur et sur toute la longueur des cages filantes, un fer à béton de 1,5cm de diamètre. Ce fer horizontal serait relié, par crochetage, à un fer à béton de même diamètre, mais positionné verticalement sur toute la hauteur des murs (crocheté depuis les fondations jusqu'au haut du mur) et à l'intérieur des angles du bâtiment. L'étude de résistance des procédés constructifs déterminera s'il est nécessaire ou pas de mettre en œuvre une telle consolidation pour assurer la résistance parasismique de l'ouvrage, d'autant plus que l'usage de fers à béton entraîne des surcoûts.

- **Sol du rez-de-chaussée :**

Dans la cour, il est en terre battue et légèrement en pente vers l'est, afin de permettre l'évacuation des fortes pluies de mousson par une rigole ménagée au pied du mur est de la cour. Pour les mêmes raisons, le sol de la véranda en terre stabilisée est rehaussé de 23cm et celui qui est à l'intérieur de la maison de 30cm par rapport au niveau de la cour.

Dans l'habitation, le sol est constitué de terre et de paille hachée, mélangées puis compactées et lissées. La pose sur une couche de sable de grands carreaux (50*50cm) de terre cuite ou glaçurée pourrait être envisagée afin d'améliorer l'isolation thermique, la finition et l'entretien du sol (et l'étanchéité dans la pièce humide). Il existe dans la région un savoir faire traditionnel de la céramique qui pourrait permettre la réalisation de tels éléments.

- **Structure bois et cloisons du rez-de-chaussée:**

Les pans de bois utilisés comme éléments porteurs sont conçus sur le principe de ceux des maisons à colombages. Deux poutres continues (17*17 cm) sont reliées par quatre poteaux (17*17 cm) qui déterminent trois rectangles. Les rectangles extérieurs sont contreventés par des éléments de bois (de même section) disposés en diagonales opposées, libérant le rectangle central pour le passage. Les assemblages entre les éléments de bois sont réalisés par tenon et mortaise, technique connue des charpentiers de la région. Les poutres haute et basse des pans de bois sont encastées dans les murs en gabions. Ce système d'appui des pans de bois transversaux leur procure une forte cohésion avec les éléments porteurs longitudinaux en gabions, ce qui renforce la résistance de la construction.

- **Plancher de l'étage**

Le plancher de l'étage est soutenu par six poutres de 10*20 cm espacées de 120 cm, encastées dans le mur en gabions nord et reposant sur les appuis intermédiaires (pans de bois et murs en gabions de refend) par recouvrement à mi-bois. Des bois d'également 10*20 cm sont intégrés dans les cages en gabions des murs est et ouest et fixés aux poutres de rive. Les lattes de planchers d'une largeur d'environ 10 cm et d'une épaisseur de 2 cm sont fixées en diagonale et directement sur les poutres. Cette disposition permet de contreventer le plan horizontal en formant un diaphragme. Une isolation phonique peut-être assurée par l'ajout de plaques de feutre et/ou de solives entre les poutres et le plancher.

- **Structures et enveloppes en bois de l'étage**

Deux options sont proposées pour la structure légère de l'étage :

Le premier système constructif s'apparente au système *platform* (V.1). Il utilise de petites sections de bois (5*10), clouées tous les 60 cm sur une lisse basse et une lisse haute continues et de même section. La lisse basse est elle-même fixée à des planches de bois de 5*15cm, incorporées dans les cages du sommet des murs en gabions. L'ensemble forme des panneaux de bois qui sont reliés aux panneaux transversaux formant les murs de refend. Le faible entraxe entre les montants facilite le contreventement des panneaux qui est réalisé par la pose en diagonale d'un bardage en bois sur leur face extérieure, et d'un lambrissage sur leur face intérieure. L'étanchéité de la paroi est assurée par un film plastique. Le vide d'air à l'intérieur du panneau et la pose de plaques de feutre en sous-face du lambrissage assure une bonne isolation thermique. La mise en œuvre de tels panneaux a pour avantage d'être rapide et peu coûteuse.

La seconde option consiste à réaliser des panneaux de bois (V.2) en branches tressées dont les montants sont espacés de 120 cm et sont contreventés par des diagonales dans les angles du bâtiment. C'est une technique qui est encore utilisée dans certaine vallée du nord Pakistan. Les panneaux sont ensuite hourdis avec de la terre, et enduits sur leurs deux faces avec un mortier puis un lait de chaux. Dans certaines régions, des décorations en relief sont ajoutées à l'extérieur des murs ainsi réalisés. Les murs de refend sont réalisés, pour les deux options, avec cette technique.

- **Charpente et toiture**

Les pannes de la charpente (10*5), espacées de 60 cm, prennent directement appuie sur la lisse haute des panneaux de bois. Une série de chevrons plus espacés sont fixés perpendiculairement aux pannes. La charpente supporte des plaques de bac acier galvanisé ou de tôle ondulée galvanisée (d'épaisseur suffisante) qui sont recouvertes d'une couche de 5 cm de terre damée. L'avantage du bac acier est de permettre de réduire l'épaisseur de terre qui alourdit le toit, d'envisager un captage des eaux pluviales et d'assurer l'étanchéité du toit. La terre permet quant à elle de protéger l'acier du rayonnement solaire et agit en isolant thermique. L'isolation peut être renforcée en fixant en sous face du toit des plaques de feutre. Une grille doublée de feutre (ce qui permet de filtrer l'eau) retient la terre en bout de toit tout en permettant le captage des eaux pluviales dans un chéneau en acier galvanisé ou PVC. Un débord de toit de 45 cm assure la protection du haut des murs. Si l'habitation est isolée en montagne, l'exiguïté des parcelles ne permet pas la réalisation d'une cour ; l'espace de la cour est alors reportée sur le toit, qui procure ainsi une aire libre suffisamment grande pour accueillir les pratiques familiales quotidiennes et saisonnières. La pente du toit est alors de seulement 1% afin de faciliter l'écoulement des eaux par gravitation.

- **Ouvertures**

Les châssis et les cadres des ouvertures (portes et fenêtres) sont en bois (cèdre et mélèze imputrescibles ou pin qui requiert un traitement de surface). On prendra un soin particulier à ménager des ventilations hautes au-dessus des ouvertures. Les linteaux (planches de 2 à 3 cm d'épaisseur) sont directement intégrés dans les cages en gabions. Il serait préférable, et ce notamment en zones montagneuses, d'utiliser à la place du verre des plaques de méthacrylate (ou PVC) transparent et isolant, pour leur poids réduit (transport et structure légère), leur facilité de mise en œuvre (découpage) et leur performance thermique (double paroi avec vide d'air isolant). Cependant, le coût s'avère supérieur à celui du verre, surtout si celui-ci est récupéré et recyclé. Au niveau de l'étage, la façade sud (voir la coupe BB, V.2) est entièrement vitrée et protégée des rayonnements solaires de l'été (par l'inclinaison de 20° de la paroi). Ce dispositif procure à l'espace à l'arrière de la paroi, une véritable fonction de loggia, qui permet de chauffer naturellement l'étage en hiver, d'y faire sécher des récoltes, etc...

Afin toutefois de protéger cet espace des trop grosses chaleurs (durant notamment les saisons intermédiaires) et d'assurer l'intimité du foyer, les plaques en méthacrylate ou de verre peuvent être badigeonnées d'un lait de chaux sur leur face intérieure.

- **Confort thermique et usage du feutre**

Comme nous l'avons vu, l'isolation thermique du rez-de-chaussée sera assurée par l'épaisseur des murs en gabions (50 cm) et l'enduit intérieur en terre et paille hachée.

En ce qui concerne la version 2, à l'étage, l'isolation thermique sera assurée par la paroi elle-même, constituée d'un mélange de terre et de paille hachée sur une armature en branches tressées.

En ce qui concerne la version 1, à l'étage, cette isolation thermique sera assurée par la pose de plaques de feutre, d'une épaisseur de 3 cm sur la face intérieure de la paroi intérieure et éventuellement en sous-face du toit.

Il est également prévu d'utiliser des plaques de feutre de 1,5 à 2 cm d'épaisseur pour réaliser les cloisons légères de la maison. Ces plaques seront tendues sur un cadre en bois facilement démontable. Le feutre agira ainsi comme séparation visuelle et isolateur acoustique. L'usage de telle cloison permet de ne pas définitivement figer l'agencement des espaces de la maison.

Le feutre est une sorte d'anti-tissu. La fabrication du feutre repose sur un phénomène à la fois mécanique et chimique connu en Asie centrale depuis plusieurs millénaires. Elle procède d'un enchevêtrement de fibres animales (laine de mouton en général) soumises à l'action combinée de la chaleur humide et du mouvement : les écailles, qui forment la surface de la fibre de laine, s'accrochent entre elles et l'ensemble se resserre. La chaleur et l'humidité augmentent la frisure de la laine et facilitent l'enchevêtrement des fibres, l'acidité favorise l'ouverture des écailles. Si la laine est en plus pressée ou confinée (prise entre deux épaisseurs de toile, ensuite roulée, serrée et tassée), on obtient une plaque lisse, mais dont la structure non homogène emprisonne l'air. Le feutre est ainsi un splendide isolant et une invention géniale; la matière de la tente, du vêtement, de l'armure chez les peuples de l'Asie centrale. Son usage, encore présent aujourd'hui dans certaines régions du nord Pakistan (notamment pour la confection de tapis), renvoie au passé nomade des peuples qui y vivent. Sa production est techniquement assez simple et économique.

Afin de chauffer la maison en hiver, il est également prévu d'expérimenter un système de poêle/four en céramique armée, qui pourrait fonctionner, soit au bois, soit avec des briquettes de charbon et sciure de bois. Les fumées chaudes circuleraient dans des murs creux en maçonnerie de briques (armées par du grillage puis enduites à la chaux) de 20 cm d'épaisseur, avant d'être évacuées par la cheminée. Un système de clapets permettrait de contrôler le débit de fumée. Ces murs seraient reliés entre eux par des conduites en éléments de terre cuites enduits à la chaux.

En été, la fermeture des clapets à l'entrée des murs chauffants permettrait de n'utiliser le four que pour la cuisine. Ce type de dispositif, qui peut-être amélioré, est utilisé depuis longtemps dans des pays à hiver rigoureux, tels que la Mongolie ou la Russie.

- **Ventilation et hygiène**

Afin de faciliter la ventilation de la maison, mais ne pas provoquer de trop fortes déperditions de chaleur durant la saison froide, des aérations sont ménagées dans le haut des menuiseries des ouvrants.

En été, l'air chaud peut s'évacuer vers l'extérieur au niveau de la sous-face du toit. La position des ouvertures permet en outre de capter les vents dominants.

Dans le projet, nous prévoyons d'aménager une salle de bain qui serait alimentée en eau par gravité depuis un réservoir surélevé situé dans la cour (si la maison n'est pas déjà connectée à un réseau ; dans ce cas, le réservoir serait utilisé en complément). La salle d'eau sera en grande partie carrelée, offrant la possibilité d'installer un lavabo et une douche ainsi que plusieurs rangements.

Le réservoir alimentera également une arrivée d'eau dans la partie préparation des repas de la pièce principale.

D'autre part, un investissement particulier est envisagé auprès des femmes (très souvent marginalisées dans la société traditionnelle pakistanaise) afin d'améliorer l'hygiène et d'adapter les espaces et les services des maisons aux besoins familiaux.

- **Eau et énergie**

L'eau pluviale est captée sur le toit, puis stockée dans un réservoir de 2000L installé dans la cour. Ce réservoir peut être muni d'un filtre à charbon afin de débarrasser l'eau de ses micro-organismes. L'alimentation des arrivées d'eau dans la maison se fait par gravité. Les conduites PVC seront protégées afin d'éviter qu'elles ne gèlent et éclatent en hiver. Un chauffe-eau solaire peut-être installé sur le toit, mais l'usage d'une telle technologie nécessite l'apport d'une pompe électrique pour faire circuler l'eau en circuit fermé.

Le recours à l'énergie solaire et/ou éolienne peut-être envisagé pour fournir de l'électricité aux habitations isolées ou pour compléter le réseau. Une surface de 2 m² de panneaux photovoltaïques (dont l'inclinaison optimale se situe entre 20 et 30°) peut fournir 200 kWc par an. Une éolienne à axe verticale, dont le rendement est meilleur qu'une éolienne à axe horizontale, peut être fabriquée localement.

III. Modélisation et dimensionnement des éléments

Deux approches sont possibles afin de modéliser et tester les éléments constructifs du prototype et ainsi la pertinence de l'emploi de gabions dans le dispositif parasismique :

- Soit on considère que le mur est un ensemble solidaire monolithique en matériau homogénéisé (modélisation plus simple à réaliser, mais moins précise)
- Soit on a recours à une modélisation par éléments finis (cages, pierres, fil de fer), qui est plus complexe à réaliser, mais plus précise.

Quelle que soit l'approche adoptée, le but est de détecter les zones vulnérables de la structure en statique et en dynamique et de les renforcer au mieux.

L'étude doit donc aboutir à :

- une optimisation de la taille des blocs de pierres (en portant l'attention à une remontée de fissure éventuelle du sol à travers les joints des blocs)
- un dimensionnement adéquat des câbles qui relient les cages.

En statique :

On doit déterminer, après l'application d'une descente de charges pondérée à l'ELU (Etat-Limite Ultime) puis à l'ELS (Etat-Limite de Service), quels sont les efforts transmis au mur. On doit également effectuer les vérifications appropriées en contraintes selon la combinaison de charge considérée.

En dynamique :

On doit isoler le mur de la structure en considérant les sollicitations qui lui reviennent en statique (en majorité les charges permanentes dues au poids propre des matériaux). Ensuite il s'agit d'effectuer un calcul dynamique, en considérant le mouvement libre de la structure pour les modes propres de vibrations puis le mouvement forcé simulé avec un accélérogramme de calcul. L'étude de l'accélérogramme permet d'accéder à la période des oscillations du sol et leurs amplitudes maximales. On définit ainsi les limites supérieures auxquelles devront résister les structures en cas de séisme. Ces limites sont déterminées par les spectres de réponses obtenus en considérant un grand nombre d'oscillateurs élastiques linéaires caractérisés par leurs masses et leurs raideurs et dont les périodes propres balaient une plage de valeurs courantes dans les structures de génie civil.