



Les techniques constructives sismo résistantes dans la Casbah d'Alger

Par Amina Abdessemed-Foufa, Département d'Architecture, Université de Blida, Algérie, et Djillali Benouar Département de Génie Civil, Laboratoire Bâti dans l'Environnement, Université de Bab Ezzouar, Alger

crédit illustrations : A. Abdessemed-Foufa

La Casbah d'Alger telle qu'appelée aujourd'hui, présente un système constructif présentant une technologie préventive adaptée à la typologie architecturale développée durant le XVIIIe siècle. Ce système a permis aux constructions d'Alger de résister aux différents séismes qui ont succédé à celui de 1716*.

Les maisons endommagées lors du séisme du 21 mai 2003 sont celles dont l'état de vétusté dû principalement au manque d'entretien, a été établi déjà en 1980 (MUCH, Atelier Casbah 1980). Les maisons intactes sont celles dont le système constructif a été adopté lors de la reconstruction après le séisme de 1716*. Par conséquent, la vulnérabilité de La Casbah d'Alger n'est pas due à son système constructif mais au manque d'entretien qui dégrade tous les jours un peu plus ces constructions. Il serait donc souhaitable que ce système constructif traditionnel, dont la fonction sismo-résistante a diminué sa vulnérabilité sismique, soit pris en considération et adapté à la technologie de restauration actuelle du centre historique que représente La Casbah d'Alger.

Les dommages RECENSES et pathologies déduites du séisme 1716

D'après les différentes sources historiques, les différents types de dommages dus au séisme du 3 février 1716 sont énumérés au nombre de trois. Il s'agit de l'effondrement total des maisons, la destruction des murs et la rupture des planchers ainsi que l'effondrement des étages supérieurs.

La lecture des différents types de dommages, nous a conduit à déduire les pathologies qui sont à l'origine de ces dommages. Il s'agit principalement de l'absence de chaînages des murs qui a provoqué leur rupture, la mauvaise mise en œuvre des maçonneries qui a eu pour conséquence la destruction et l'effondrement de ces dernières ainsi que l'absence d'ancrage des planchers aux murs porteurs et l'absence de leur chaînage ayant engendré l'effondrement des étages supérieurs.

Suite à cela, les Algérois ont mis en œuvre différentes techniques constructives préventives pour protéger leur cadre bâti des effets des futurs séismes.

Les techniques constructives sismo-résistantes dans la Casbah d'Alger

Les techniques sismo-résistantes du XVIIIe siècle d'Alger ont été mises en évidence suite à une investigation archéologique sur le site et ont été testées après tous les tremblements de terre qui l'ont affecté depuis leur mise en place jusqu'au tout dernier séisme qui a secoué la région algéroise le 21 mai 2003. Ces représentent la structure rigide c'est-à-dire la maçonnerie porteuse, la structure flexible en l'occurrence

les arcatures, les diaphragmes représentés par les planchers, les ouvertures et les encorbellements ou *q'bu*.

Pour présenter ces techniques une investigation a été conduite aussi bien sur des maisons de la Casbah d'Alger que sur celles du *fahs* ainsi qu'au Palais du Dey.

La structure rigide

Les maisons d'Alger ont une structure rigide représentée par des murs porteurs en maçonnerie qui peuvent être classés selon le type de matériaux, la taille et la forme des blocs (Randazzo 1988). Les principaux types de murs observés sont réalisés de la façon suivante :

- Une maçonnerie réalisée par deux parois de briques de terre cuite de dimensions variables (3 x 10 x 20 cm), liées par un mortier de chaux et de sable et entre lesquelles est disposé un tout-venant (Atelier Casbah 1980). La paroi murale a une épaisseur de 60 cm et présente une stratification par couches différentes entre lesquelles s'intercalent de façon régulière à la maçonnerie des rondins de thuya non équarris de 10 cm de diamètre. Le bois dans ce cas-là n'exerce aucune force de traction (Fig.1 a).

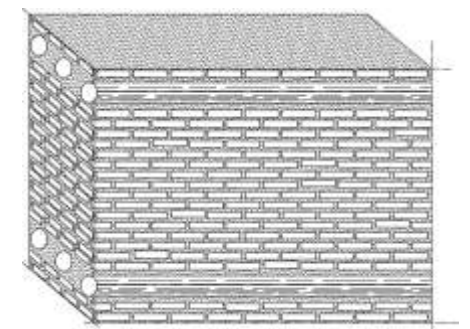


Fig 1a

* La Casbah d'Alger a été le théâtre de plusieurs tremblements de terre depuis la fin du XVIe siècle jusqu'au début du XXe siècle. Nous citons les tremblements de 1365, 1673, 1716, 1722, 1755, 1802, 1807, 1842, 1850 et 1867 (Saidouni 1985, Ambraseys 1989). Le séisme de 1716 a touché Alger et sa région et a atteint non seulement Blida située à 40 km dans la plaine de la Mitidja mais aussi Bouzehhar située à 200 km au sud-ouest d'Alger. Ce séisme a engendré l'écroulement de beaucoup de maisons (200) et d'autres furent endommagées et la Grande Mosquée se lézarda, même les maisons de campagne subirent beaucoup de dégâts. Les habitants abandonnèrent la ville et s'installèrent dans des tentes à la campagne durant les neuf mois des répliques. Le nombre des victimes s'élevait à 20.000, toutes ensevelies sous les décombres. (Manuscrits arabes anonymes, Archives Wakf Ottoman 1716, Courrier Consulaire Français 1716, Courrier de la Marine Française 1716, Gazette de France 1716, Comelin 1720, Tassy 1725, Ibn Redjeb 1740-41, Shaw 1808 et 1830, Tassy 1830, Peyssonnel 1838, Rousseau 1841, Perrey 1845, Carette 1850, Akhbar 1867, Burzet 1869, Bianchi 1877, Bargès 1887, De Grammont 1887, Trumelet 1887, Chesneau 1892, Delphin 1922, Raynaud 1930, Rothé 1950, Farah 1980, Saidouni 1985, Ambraseys et Vogt 1988, Mokrane et al 1994, Al Djillali 1995, Shuval 1998, El Mrabet-Azeroual 2002, Meghraoui 2003, Harbi 2006).

- Une autre stratification de maçonnerie réalisée par des couches de briques et de pierres où l'on a un opus mixtum (Fig 1c) ou alors une arcature de deux rangées de briques disposées dans la maçonnerie en pierre (Fig 1b).

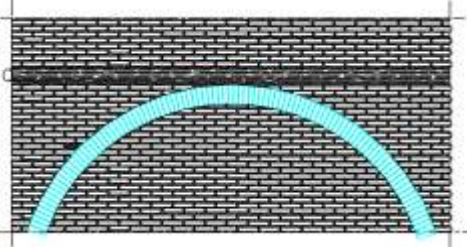


Fig 1b - Murs renforcés par une strate de brique curviligne (palais du Dey)

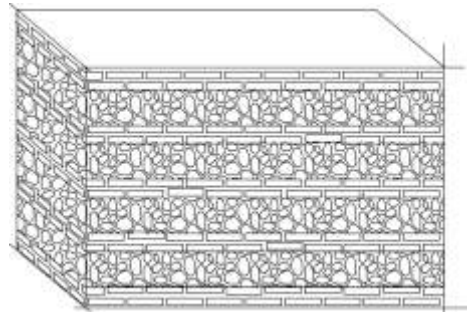
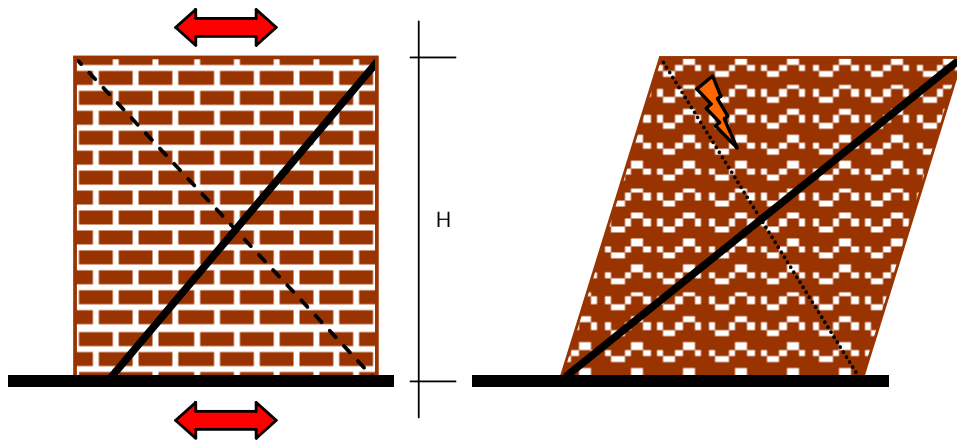


Fig 1c - Mur en briques renforcé par des blocs de pierres (opus mixtum) (palais du dey)

Cette disposition de deux matériaux l'un rigide et l'autre flexible permet une absorption des charges horizontales lors des sollicitations sismiques et tend à réduire le barycentre global des masses (Lavorgna 1989).

Par ailleurs, les murs présentent peu de fissures et ne se détruisent pas. En général, l'action sismique horizontale tend à déformer le panneau de maçonnerie en parallélogramme, provoquant la formation d'une bielle diagonale de compression qui agit au niveau des angles (Betbeder-Mailibet 1991). Les murs des constructions d'Alger étant fractionnés en plusieurs parties (trois ou quatre, selon leur hauteur) favorisent la répartition des efforts horizontaux au niveau de chaque strate et ne subissent par conséquent, aucune ou peu de déformations (Fig.2).



Les fissures des murs en diagonale dues à la déformation provoquée par les déformations de la tension et compression.

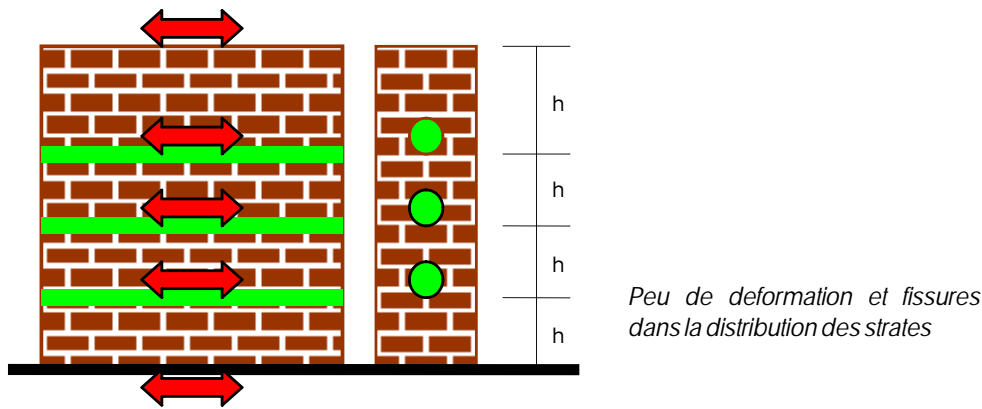


Fig 2 - Comportement d'une paroi murale renforcée

La technologie de renforcement de la maçonnerie avec du bois a été utilisée également dans les constructions traditionnelles grecques datant du XVII^e et du XIX^e siècles (Touliatos 1992, Ferrigni 2002), dans des temples du Pakistan du XVII^e siècle, mais aussi durant la période antique dans les palais mincéens (Pouroulis 1999) ainsi que dans les constructions tibétaines datant de 2500 ans A-J. (Ferrigni 2002). Ce qui, au départ, ne constituait qu'un renforcement de la maçonnerie s'est avéré, par la suite dans les zones sismiques, un système de chaînage qui renforce la structure murale et réduit ainsi sa vulnérabilité. Cette maçonnerie chaînée a acquis son rôle préventif sismo-résistant dont les effets ont été testés et prouvés lors de récents tremblements de terre en particulier sur des constructions ottomanes (Langenbach 2002).

Le Chaînage des murs

Tous les murs sont chaînés entre eux par le croisement alternatif des rondins de bois. A ce propos, Carotte (1850) décrit ce système " J'ai remarqué dans les anciennes maisons mauresques en démolition une précaution excellente prise par les constructeurs pour consolider les angles. Elle consiste à placer horizontalement, de 50 en 50 cm de hauteur, des pièces de bois d'environ 02 mètres de longueur. Ces pièces, noyées dans la maçonnerie, se prolongeaient alternativement suivant chacun des deux murs et venaient se croiser dans l'angle. J'ai vu des maisons sapées à la base et à moitié démolies se soutenir encore grâce à cet artifice de construction".

En l'absence de tout élément vertical ce système de chaînage des angles constitue une technique traditionnelle de renfor-

ement qui empêche les écartements des murs verticaux (Fig.3).

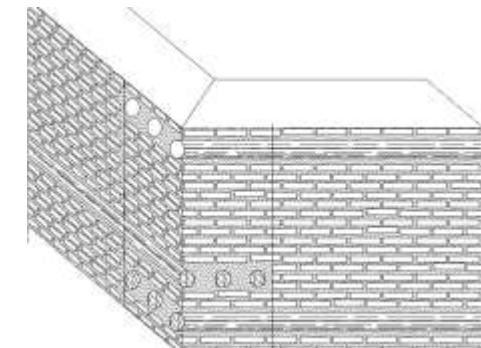


Fig 3- Chaînage des angles

Pour rendre une construction en maçonnerie traditionnelle parasismique, il est nécessaire de réaliser un système de chaînage qui forme un réseau tridimensionnel mécaniquement continu aux angles où aucun bord de maçonnerie libre ne doit apparaître. Les matériaux de chaînage qui pourraient être utilisés sont le béton armé, l'acier ou le bois (Zacek 1996 et RPA 99 Add 2003). Dans le cas des constructions traditionnelles d'Alger, c'est le bois qui est utilisé pour renforcer les angles des constructions.

Les cloisons

Selon les règles parasismiques, il faut que les cloisons soient reliées aux murs, aux poteaux ou aux planchers afin que ce ne soit pas des parois libres qui risquent de s'effondrer sous l'effet des charges sismiques. Les murs intérieurs dont l'épaisseur est de 20 cm sont également réalisés de la même manière que les murs porteurs. C'est-à-dire une maçonnerie renforcée par des rondins de bois. Ils sont reliés aux murs qui leur sont perpendiculaires. Les liaisons sont souvent l'encastrement des rondins de thuya qui sont disposés transversalement et longitudinalement dans les murs qui se croisent (Fig. 4).

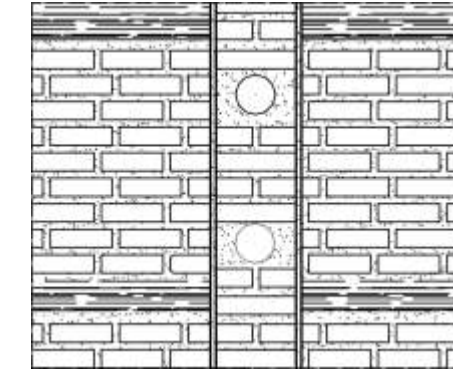


Fig 4 - Chaînage des cloisons aux murs porteurs (palais du dey)

La structure flexible

Les constructions d'Alger appartiennent au système d'arcades à deux niveaux. Cette structure flexible est représentée par un système d'arcature sur les quatre côtés de la cour. Le système est en général de quatre pans d'arcades, mais peut différer selon la taille de la maison (Fig.5a).

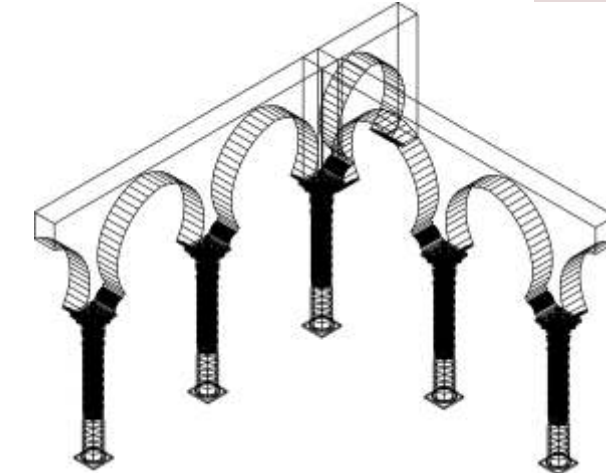


Fig 5 a - La structure flexible

L'arc développé est du type outrepassé avec une particularité spécifique à Alger. Il est de forme ogivale ou brisée (Pasquali 1952). Cette forme dont la souplesse et la flexibilité lui permettent de franchir les écartements entre les colonnes lorsqu'ils sont variables ou lorsque les parcelles ne sont pas de géométrie exacte. Cet arc est non seulement utilisé pour soutenir les galeries mais il est également utilisé comme arc de contreventement entre le portique du " wast al-dar" et les murs des chambres (Fig.5b).



Fig 5c - Contreventement par les poutres en bois (palais du dey).

تقنيات البناء المقاومة للزلازل بتقنية الجزائر العاصمة

تحتوي القصبة على طريقة بناء ممتثلة لتكنولوجيا وقائية، متناقلة مع هندسة متطورة خلال القرن 18. قاومت بنايتها لأعنف زلازل شهدته الجزائر سنة 1716. أما الإنهيار لبعض المنازل الذي خلفه آخر الزلازل، راجع لعدم الإعتناء بالحكم بهذه المنازل. إذ يجب الأخذ بعين الإعتبار المبادئ الموجودة بالقصبة لحفاظا عليه كتراث وطني عالمي. نذكر تقنيات البناء المقاومة للزلازل بقصبة الجزائر العاصمة- هيكلية صلبة: تحتوي المنازل على جدران حاملة للبناء كأنها صخور، مركبة بواجهتين من الأجر المملوء، يصل سمك الأجرورة 20 سم، تثبت بالجير والرمل قد يصل سمك الجدار إلى 60 سم أما الطريقة الثانية، فتستعمل طبقات من الأجر المملوء بالحجر، و واحدة صلبة و أخرى مرنة، تسمح بإمتصاص المرات الأفقية بحيث لا تخلف إلا إنشاقات بسيطة. نلاحظ نفس تقنيات البناء مستعملة بالبناء الأغرقي التقليدي والباكستاني. نجد أيضا بناء القصبة حيطان متسلسلة متصلة ببعضها البعض بحطب (أسطوانات من الحطب) يستعمل لتجنب إنفصال الجدران. أما الحاجب أو الفاصل فهو متصل بالجدران والأعمدة وكذا بالخشب حتى لا تتبع الجدران حرة: يحتوي بناء العاصمي على شرف ورواقات مقوسة بمستويين، مجدها خاصة بحواف الساحة. هذه الأقواس جزائرية بحتة، شكلها إما قوطيا أو منكسرا، مرانيتها تسمح بانفتاحها عند أي تحريك ناجم عن زلازل. تستعمل هذه الأقواس بالرواقات وفي " وست الدار" وبالغرف أيضا. بناؤها خاضع لتقنية خاصة جدا: وذلك ببناء طبقية مشكلة من ثلاث أسطوانات حطب، مركبتين بصفين من الأجر المملوء بالتربة الجففة. نلاحظ أنه قد استعملت مادتين في هذه الحالة، واحدة مرنة و أخرى صلبة تضمن الحركة و الإنزلاق الناجم عن الزلازل، و من ثم حماية البناية من أي انهيار. الخشب: تستعمل نوع خاص من الحطب الصلب للسقف، مفا وم للإنضغاط في حالة الزلازل، مركب من طبقتين من الحفصية على طول الخائط، توضع عليه عدة طبقات من الخشب والزبة، ثم يركب فوقه البلاط. إضافة إلى كل التقنيات السابقة، نجد تقنية خاصة بالبناء العاصمي تستعمل في البناء العاصمي، تستخدم فيها أسطوانات من الحطب، تتركب خارجة نوعا ما عن حدود جدران المنزل. مجدها بالداخل مسندة بعارضة خشبية، تجرز حوافها بالجدران الجانبية، هذه الطريقة تزيد أيضا قوة للبناء ومقاومة للزلازل، إذ لم يتعرض أي منزل محتو على هذه التقنية إلى الإنهيار خلال الزلازل الأخرى. (تسمى هذه التقنية encorbellement). أما الإنفتحات الموجودة بهذه المنازل من نوافذ و أبواب، فإطارها مصنوعة من أسطوانات حطب دوراني من الحفصية، تجرز و تثبت بطريقة جد حكمة بالبناية. نذكر بعض المنازل النموذجية الموجودة بالقصبة: " منزل أنتراموروس. الفحص الداوي..."

L'arc algérois présente une technique constructive assez particulière au niveau de son articulation avec la colonne :

- Superposition de trois rondins de thuya à une assise de deux rangées de briques de terre cuite (Fig. 6a).
- Superposition perpendiculaire de deux rangées de trois rondins de thuya à une assise de briques de terre cuite (Fig. 6 b).

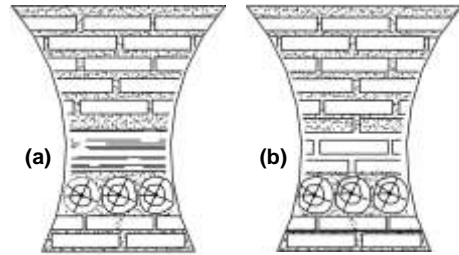


Fig 6 - (a) - Détail départ arc : superposition de deux rangées de thuya
(b)- Détail départ arc : une rangée de thuya

Cette superposition de deux matériaux, l'un rigide et l'autre flexible, garantit grâce aux mouvements de glissement ou de roulement une bonne résistance aux cisaillements dus aux sollicitations sismiques. Le

système d'arcature est ainsi préservé et le détail constructif préventif contribue à la résistance parasismique. Le monolithisme requis par le RPA qui stipule que les différentes parties de la structure doivent être convenablement liées entre elles pour éviter la désolidarisation de leurs éléments sous l'action des secousses sismiques, est également assuré par des poutres en bois qui raccordent les façades des galeries à celles des murs porteurs évitant ainsi l'écartement des parois extérieures à celles intérieures (Fig.5 c).

Les planchers

La nécessité de réaliser des planchers rigides dans leur plan (diaphragmes), c'est-à-dire par des planchers et des toitures résistant au cisaillement et à la flexion, de manière à assurer la transmission des forces horizontales aux éléments de contreventement et, par-delà, aux fondations, est indispensable dans les conceptions parasismiques. Pour les constructions en maçonnerie traditionnelle, le code para-sismique n'admet pas de diaphragmes flexibles comme les planchers en bois. Or à Alger, les planchers et les toitures terrasses sont réalisés en bois mais leur typologie constructive est particulière. Ils sont constitués par une superposition de deux rangées de thuya insérées dans toute la largeur des murs porteurs créant ainsi une différence de niveau. Entre les deux rondins est disposé un voligeage en bois. Au dessus de ces deux rangées de rondins de thuya sont disposées diverses couches de pierraille et de terre sur lesquelles est disposé le mortier puis le carrelage (Fig. 7a et b).

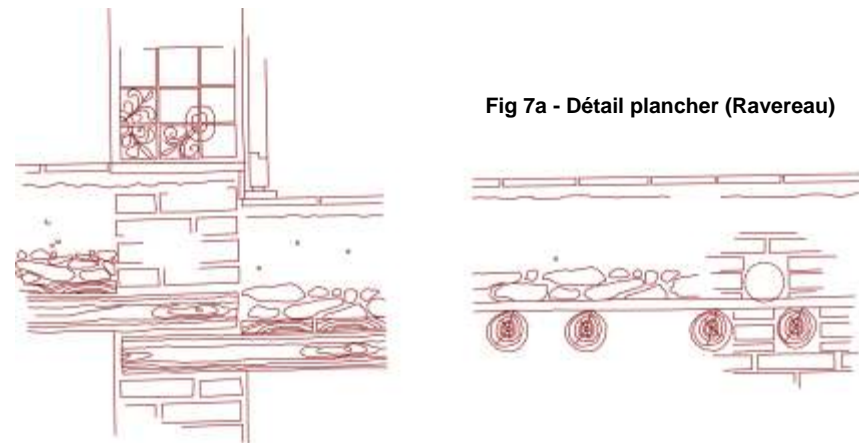


Fig 7a - Détail plancher (Ravereau)



Fig 7b - les planchers sont constitués d'une superposition de rondins de thuya insérés dans toute l'épaisseur du mur, créant une différence de niveau. Entre deux rangées de bois est disposé un voligeage qui permet le mouvement par roulement ou glissement

Dans le règlement, préconisé par les normes parasismiques, les constructions traditionnelles en maçonnerie doivent se comporter comme une structure rigide susceptible de résister aux effets de torsions induits par le déplacement des murs en maçonnerie. Ils préconisent de ce fait l'utilisation des planchers en béton armé formant un diaphragme rigide. Le bois utilisé en armature remplace le béton armé sans exercer de traction. L'épaisseur et la composition du plancher constituent la rigidité requise par les règles parasismiques qui est susceptible de résister aux efforts de torsion induits par les déplacements des murs. Par ailleurs, cette structure du plancher facilite l'absorption des efforts horizontaux lors du mouvement de glissement ou de roulement et réduit ainsi la rupture des planchers.

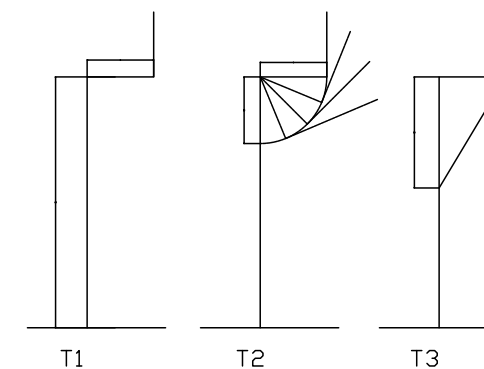
Les encorbellements

Dans les rues d'Alger des encorbellements résultent d'une extension en profondeur, donnent sur la rue. Des avant-corps soutenus en étage supérieur par des rondins de thuya débordant largement du mur. Leur plus longue partie est à l'intérieur des espaces maintenus par une solive transversale de même type dont les extrémités sont encastées dans les murs latéraux (Fig.8 a). Ce jambage minimise la fréquence oscillatoire de l'encorbellement lors des secousses sismiques et ne se brise pas (Fig.8 b).

Lors du dernier séisme du 21 mai 2003 à La Casbah de Dellys, située dans la zone sinistrée, toutes les maisons ont été détruites. Ces encorbellements sont les seuls éléments architectoniques qui n'ont subi aucun dommage. Malgré l'effondrement des parois murales, des planchers et des escaliers, ils sont restés intacts. Cela est dû probablement à leur typologie constructive qui, semble-t-il, est similaire à celle des constructions d'Alger (Fig.8c).



Fig 8a - Les encorbellements



T1: encorbellement simple
T2: au moment du choc sismique, l'encorbellement sans jambage, effectue un mouvement oscillatoire qui risque de se briser si la fréquence augmente
T3 : le jambage en bois de thuya, réduit les mouvements oscillatoires et prévient la rupture du panneau. Il a également pour rôle de maintenir l'encorbellement qui oscille à petite amplitude. En général, la largeur de l'encorbellement vaut les 2/3 de la hauteur du jambage.

Fig 8b - Comportement des encorbellements avec jambage



Fig 8c - Encorbellements non détruits à Dellys

Les ouvertures

Le code parasismique préconise pour des constructions en maçonnerie des encadrements rigides des ouvertures réalisés en béton armé, acier ou en bois et, en principe, doivent être reliés aux chainages. Les encadrements en bois doivent être efficacement liés à la maçonnerie (Zacek 1996). Les ouvertures des



Fig 9- Renforcement des ouvertures avec du bois (Palais du Dey et maison du fahs)

maisons d'Alger, portes et fenêtres, sont encadrées par des rondins de thuya qui est bien encasté dans la maçonnerie. Cela apparaît dans les maisons intra-muros, dans celles du Fahs ainsi que dans le Palais du Dey (Fig.9).

Cet article est un extrait de "Contribution for a Catalogue of Earthquake Resistant Traditional Techniques in Northern Africa : the case of the Casbah of Algiers" paru dans European Earthquake Engineering Journal, 2, 2005.