



Outil 8

Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures

La réhabilitation des éléments structuraux de l'architecture traditionnelle méditerranéenne

1. Principes généraux

Au vu du grand éventail de techniques applicables aux interventions de réhabilitation structurelle des bâtiments de l'architecture traditionnelle méditerranéenne, il convient d'énoncer quelques principes généraux qui guideront le choix de la technique appropriée en fonction de la situation qui se présentera. Aussi, avant de passer en revue les procédures et les techniques disponibles, commencerons-nous par exposer synthétiquement les aspects déterminants de toute intervention, quel que soit l'objectif ciblé ou la problématique à résoudre.

a. Connaissance et adaptation au contexte technologique du lieu

La faisabilité de l'application de la technique d'intervention retenue avec les ressources disponibles sur place, de la manière la plus naturelle possible, en profitant des connaissances et des savoir-faire des artisans du secteur, est une priorité essentielle qui se traduira toujours par une réduction des coûts de l'intervention, comparée à d'autres solutions applicables et, probablement, par une compatibilité plus aisée, doublée d'une meilleure adaptation aux caractéristiques des techniques constructives d'origine.

b. Considération globale des répercussions de l'intervention

Il ne faut pas oublier que les interventions –quelle que soit la spécificité de leurs objectifs– peuvent avoir des effets complémentaires très divers dont il faudra tenir compte avant de prendre une décision. Par exemple, renforcer un mur extérieur par l'application d'une couche de béton projeté servira aussi à le rendre plus étanche ; ajouter une dalle de compression armée à un plancher renforcera l'isolation acoustique. Dans tous les cas, il faut également examiner les effets négatifs qui lui seront probablement associés, tels que la modification des espaces par la mise en œuvre de poutres maîtresses ou de piliers, l'obligation d'effectuer des travaux d'entretien sur les parties ajoutées, etc. Par conséquent, il y a lieu de considérer tous les effets dans leur ensemble, qu'ils soient favorables ou défavorables.

c. Clarté de l'approche mécanique et structurelle

Dans les travaux de réhabilitation structurelle des bâtiments, il convient de spécifier clairement l'objectif technique visé par l'intervention proposée. Trois approches sont possibles :

1. La restauration de la capacité portante initiale de l'élément à réhabiliter. Il s'agit, de fait, de ce que nous interprétons habituellement comme étant la réparation de l'élément endommagé ;
2. L'augmentation de la capacité portante de l'élément sur lequel

César DÍAZ GÓMEZ

Docteur architecte

Professeur des universités au Département des Constructions architecturales I de l'École technique supérieure d'Architecture de Barcelone, Université polytechnique de Catalogne, Espagne

nous intervenons, qui équivaut généralement au renfort de l'élément endommagé ;

3. Le remplacement fonctionnel de l'élément par un nouvel élément assumant entièrement la capacité portante requise, sans retirer nécessairement l'élément à réhabiliter.

Bien sûr, le choix de l'approche dépendra des exigences mécaniques requises ainsi que de la capacité à les satisfaire de l'objet de l'intervention.

d. Singularité des interventions portant sur des bâtiments d'une valeur patrimoniale particulière

Quand le bâtiment est un *bien culturel* d'une valeur patrimoniale particulière, il convient de penser à d'autres aspects spécifiques qui assureront la préservation au fil du temps de ses caractéristiques d'origine. C'est ainsi que des notions telles que la *réversibilité*, qui permettra au besoin d'éliminer les effets d'une intervention, seront jugées prioritaires dans le choix de la technique à appliquer. Par contre, dans un autre domaine plus essentiel, il sera admissible, sans avoir à fournir d'autres arguments pour en justifier la pertinence, de choisir de *restaurer à l'identique*, à condition bien sûr que la prestation fonctionnelle de la méthode réponde aux exigences de l'intervention.

2. Interventions sur les murs et les piliers

Les matériaux et les appareillages des murs épais d'autrefois, en pierre et en terre, sont peu résistants aux tensions de traction et de cisaillement. Précisons aussi que l'eau les fragilise considérablement du fait de la forte perméabilité de la terre et de la plupart des mortiers employés.

Il en ressort quelques règles générales d'intervention sur ces éléments qui, alliées aux premières règles citées plus haut, vont conditionner le choix de la technique de réparation ou de renfort à appliquer dans chaque cas. Plus précisément et quelle que soit la technique appliquée, il faut prendre soin de distribuer de manière homogène les sollicitations introduites, afin d'éviter dans la mesure du possible des efforts additionnels de traction ou de cisaillement dans le mur. De même, il y a lieu de ne pas augmenter les efforts de compression, vu la difficulté à caractériser cet effort par des essais dans la plupart des vieux murs. Pour terminer, il peut être utile de chercher à absorber les efforts dans le plan transversal du mur, en créant ainsi une résistance capable de le rendre plus robuste et de contenir les poussées.

Nous allons examiner maintenant et commenter les techniques d'intervention qui s'appliquent le plus souvent à ces éléments.

a. Remplacement physique de la partie endommagée

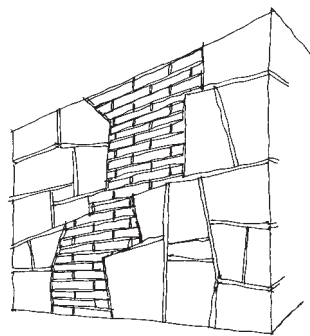
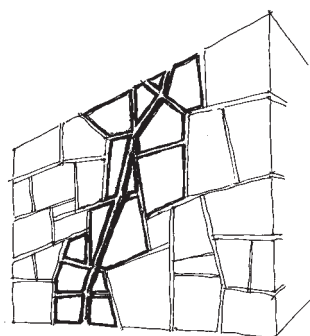
Il s'agit de remplacer le matériau de la partie fissurée, bombée ou menacée par la dégradation et de reconstruire avec le même matériau ou d'autres dont la résistance et la déformabilité seront similaires. Dans les murs ou les piliers en pierre ou en brique, l'usage veut que l'on reprenne le même matériau, tandis que dans les murs en terre, on pourra employer la brique. Dans tous les cas, l'objectif de l'intervention ne peut que prétendre restaurer la capacité portante initiale de l'élément endommagé.

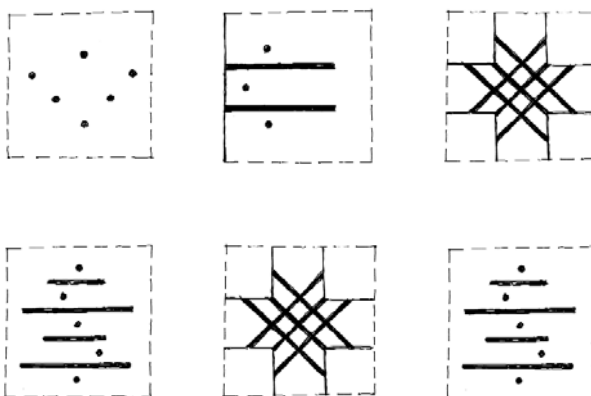
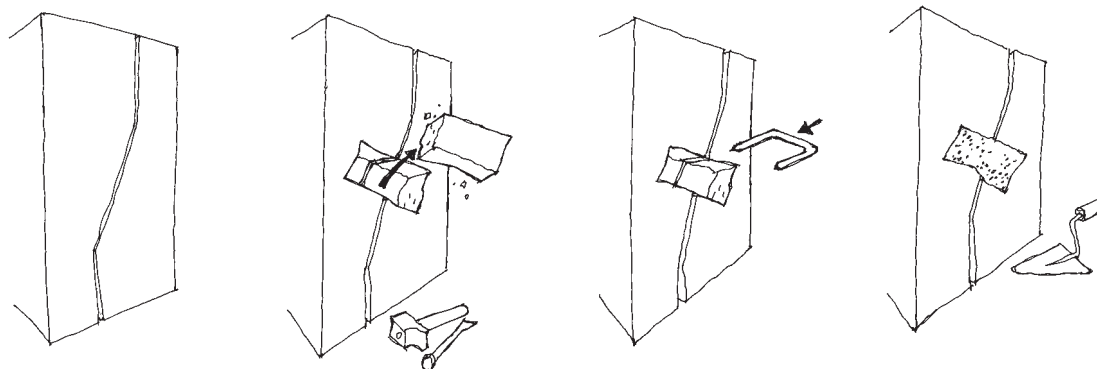
Il est important de ne pas oublier que ce type d'intervention requiert l'élimination préalable de la cause du problème ou au moins la constatation d'un dommage passif au sens où la cause aura cessé d'agir. En ce qui concerne l'exécution, il faut prendre grand soin du contact de la partie remplacée avec l'ouvrage, pour assurer une correcte transmission des charges, sans oublier la similitude déjà citée de leurs caractéristiques mécaniques.



b. Reprise de fissures

La méthode consiste à intercaler entre les lèvres de la fissure du mur des éléments plus résistants et plus rigides en guise de sutures, tels que des agrafes métalliques, des morceaux de brique, etc. Il s'agit de retrouver la continuité perdue du mur endommagé, de sorte que les tensions puissent être de nouveau transmises et distribuées de manière homogène dans la partie lésardée. Pour que cette méthode soit efficace, il faut que la fissure soit passive comme nous venons de l'expliquer, c'est-à-dire que la cause de son apparition n'agisse plus sur la partie à réparer.





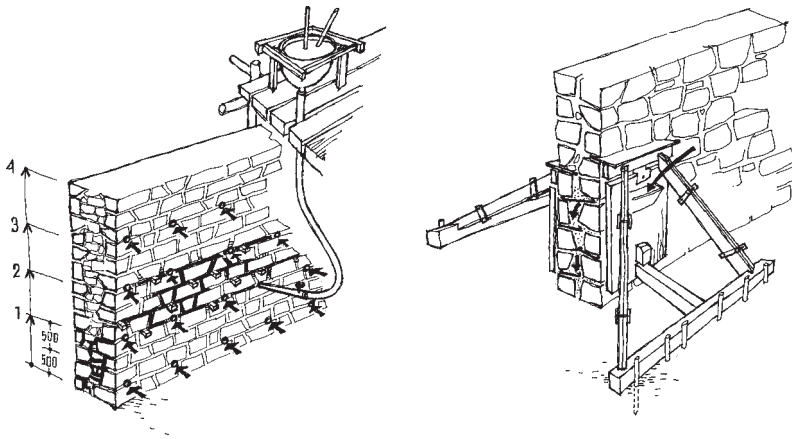
c. Injections

Il s'agit d'un autre système de réparation de fissures et de brèches passives, applicable à des murs en maçonnerie appareillée ou en brique, qui consiste à introduire un liquide sous pression pour colmater entièrement le vide entre les lèvres de la fissure. En durcissant et en adhérant au support, ce liquide restitue à l'élément endommagé sa continuité d'origine. Les caractéristiques du liquide –généralement à base de composants époxydiques– et la pression d'injection varient en fonction des matériaux du mur et de la taille du trou à reboucher. Le scellement superficiel, préalable à l'injection dans la fissure ou la brèche, doit être capable de supporter la pression du liquide avant son durcissement.



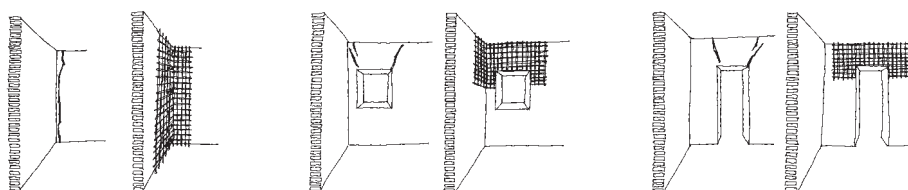
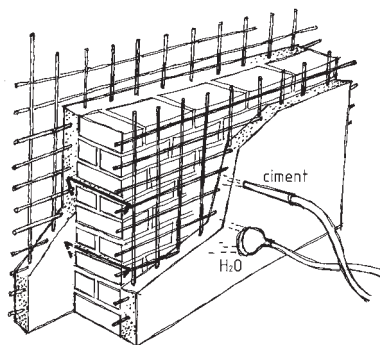
d. Rejointoiements

C'est une procédure de restitution de la résistance initiale applicable aux murs en pierre ou en brique qui consiste à rejointoyer au mortier les parties détériorées par l'érosion ou par les racines de plantes qui ont poussé entre les pierres. Des produits de densité ou de viscosité variables sont introduits par gravité ou par infusion, en fonction de la technique d'exécution employée.



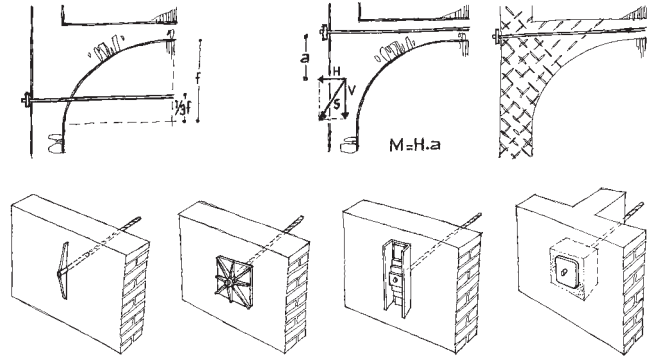
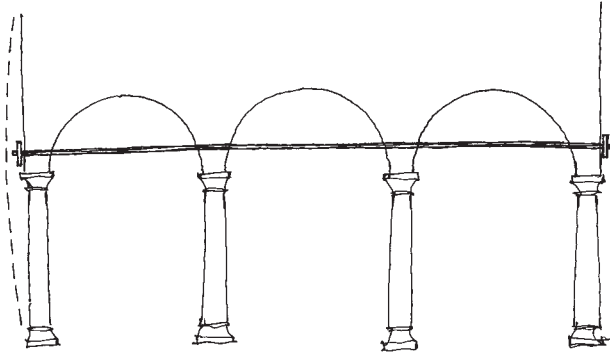
e. Enduit de renfort à base de mortier ou de béton armé

Cette technique consiste à augmenter la section du mur endommagé ou sous-dimensionné en incorporant aux parements des épaisseurs de matériau –mortier ou béton– après la pose de treillis métalliques, solidarisés entre eux dans le mur. La mise en œuvre du matériau de renfort peut se faire en disposant des coffrages parallèles aux parements et en y coulant ensuite la préparation, ou bien par simple projection sur les parements avec le treillis déjà en place ou encore par gunitage en choisissant la procédure selon l'épaisseur requise et le supplément de résistance attendu du renfort. Cette solution est très polyvalente en ce qu'elle s'adapte à des structures de murs complètes, à des murs entiers ou à des pans précis. Cette qualité la rend tout spécialement appropriée pour renforcer des bâtiments que les mouvements sismiques auront abîmés, en augmentant la rigidité des parties du bâtiment qui l'exigent et, au besoin, celle de l'ensemble du bâti.



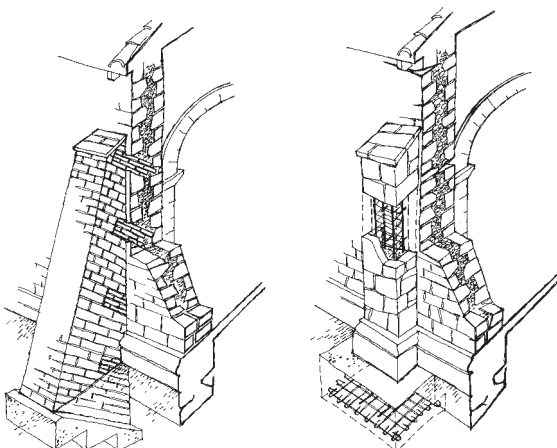
f. Pose de tirants

La pose de tirants dans les structures murales vise généralement à freiner l'effondrement des murs ou leurs déformations progressives transversalement à leur plan. Cette méthode consiste à disposer des éléments linéaires qui vont exercer des tractions. Appelés tirants, ces éléments sont constitués en principe d'un câble d'acier et fixés à deux murs opposés par des pièces spécifiques d'ancrage qui évitent l'évolution de leur écartement et la perte subséquente de leur capacité résistante. Il convient de prévoir que l'un des deux éléments d'ancrage, au moins, admettra le réglage périodique de la tension pour compenser les effets de l'allongement éventuel du tirant.



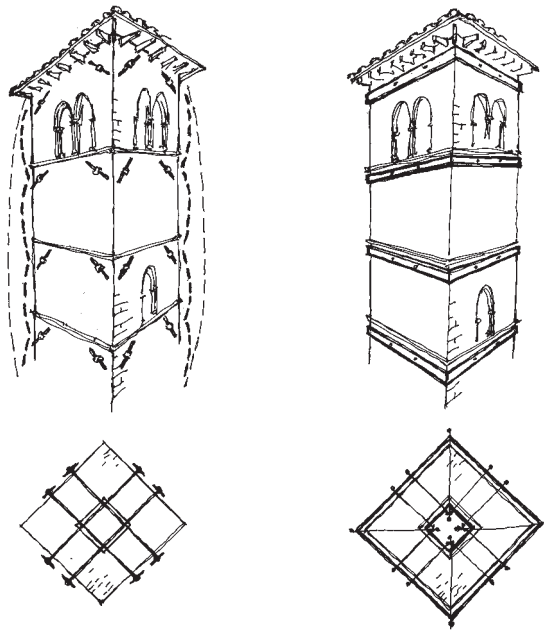
g. Contreforts

Leur fonction équivaut à celle des tirants et il est pratiquement obligatoire de les appliquer lorsque le bâtiment ne dispose pas d'éléments suffisamment rigides, capables d'absorber les tensions ponctuelles créées aux points d'ancrage des tirants. Dans ces cas, l'absorption des poussées des voûtes, des arcs ou de tout autre élément qui introduirait des sollicitations inclinées dans les murs, peut être confiée aux contreforts, car ils sont capables de transmettre ces actions au terrain à travers leur section. Dans la conception et le calcul du contrefort, il faut tenir compte de la forte limitation de l'assise requise par le nouveau contrefort pour fonctionner correctement.



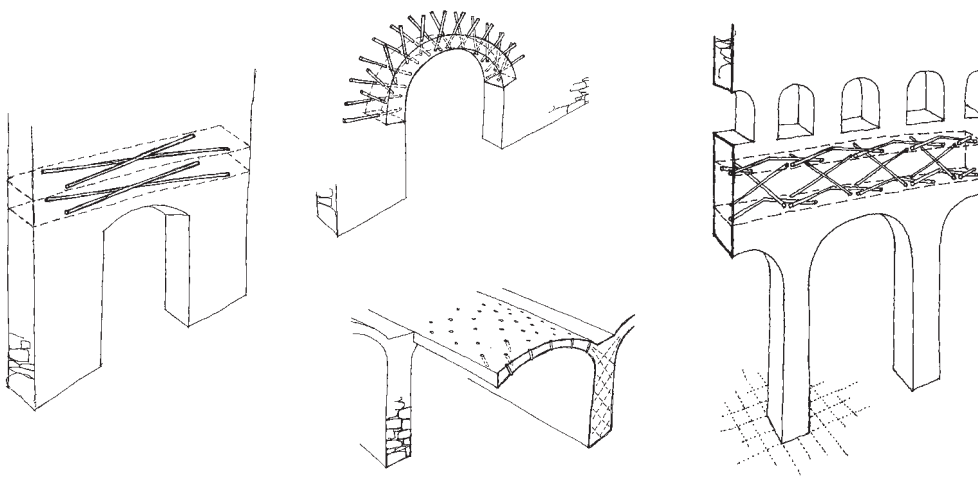
h. Chainage

La disposition de ceintures ou de courroies sur le pourtour de murs structurants fermés, montés avec un appareillage en brique, d'un bâtiment ou sur ses piliers en pierre ou en brique, pour les rendre plus robustes et augmenter leur résistance, est un système ancien que l'on retrouve dans de nombreux édifices historiques bien connus, tels que le Colisée romain ou les clochers italiens du Moyen Âge. Le fer et l'acier sont les matériaux employés depuis longtemps pour fabriquer ces éléments. Plus récemment, les bandes en fibre de carbone remplissent la même fonction dans certaines situations. Néanmoins, il est nécessaire de considérer les effets du matériau qui adhère à l'élément renforcé.



i. Taxidermies avec des barres d'acier

C'est un système de renfort intégral, applicable aux murs en pierre ou en brique, qui consiste à mettre en œuvre des armatures en acier à l'intérieur du mur, embouties dans des perforations atteignant parfois quelques mètres de longueur, de sorte à créer de véritables structures secondaires de barres à l'intérieur des murs, pour augmenter leur capacité de résistance globale ou créer des zones plus rigides, capables de distribuer de manière homogène les sollicitations descendantes. Le contact entre les barres d'acier et le matériau dont le mur est constitué se fera au moyen d'un produit adhérent, généralement à base époxydique.



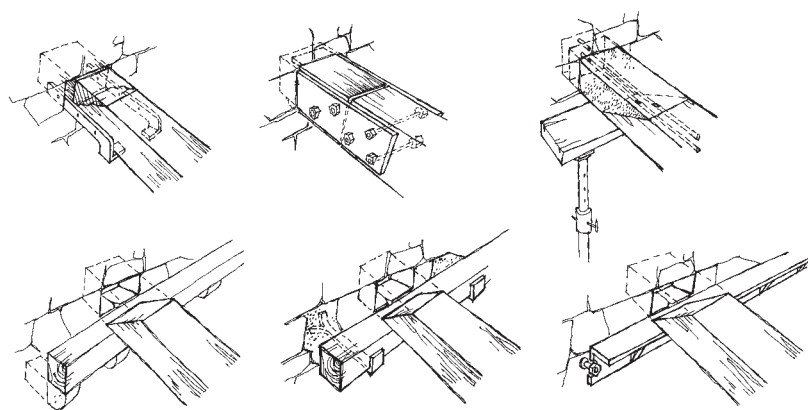
3. Interventions sur les planchers et les couvertures

Les interventions sur les planchers de poutres et poutrelles en bois doivent partir d'un diagnostic préalable des causes des dysfonctionnements, dus à l'attaque d'agents biotiques, au fluage du bois ou à des déficiences dans le dimensionnement du plancher par rapport aux sollicitations mécaniques qu'il reçoit. Le choix de l'intervention requiert la connaissance des conditions d'utilisation futures et de la nécessité de conservation non seulement des éléments sur lesquels on intervient mais aussi de ceux sur lesquels l'action prévue peut avoir une influence, tels que les faux plafonds ou les sols de grande valeur artisanale et picturale.

Nous allons exposer maintenant les formes et les méthodes d'intervention les plus usuelles sur ces éléments résistants.

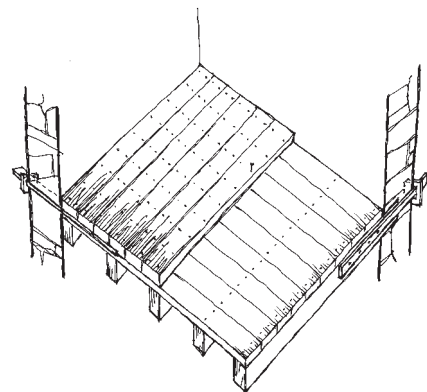
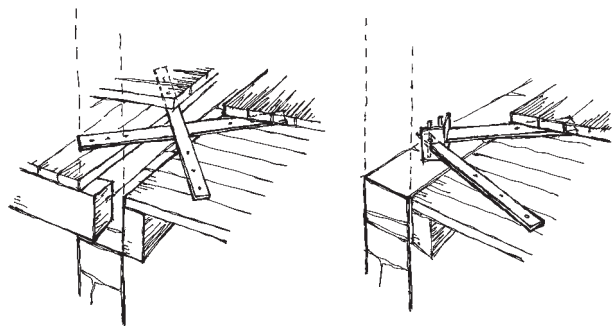
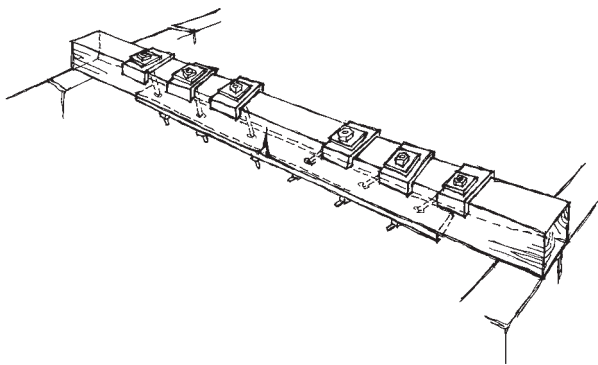
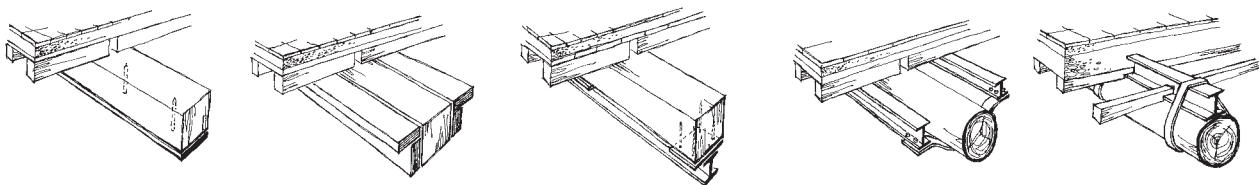
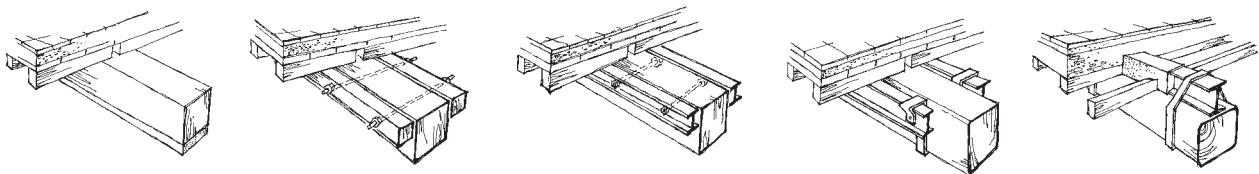
a. Remplacement fonctionnel des appuis sur les poutres et poutrelles

Les attaques de champignons et de termites se concentrent souvent sur les appuis des poutres et des poutrelles en bois, notamment du côté des murs extérieurs, à cause des conditions spéciales d'humidité et d'obscurité qui les caractérisent. Dans ces cas, il faut généralement procéder au remplacement fonctionnel ou au renfort des appuis endommagés par la décomposition du bois, à l'aide de l'un des nombreux procédés existants que l'on choisira en fonction de plusieurs paramètres : problème concernant quelques poutrelles désolidarisées ou une ligne d'appuis contigus, caractéristiques du mur sur lequel elles reposent, techniques disponibles et apparence formelle de la solution retenue.



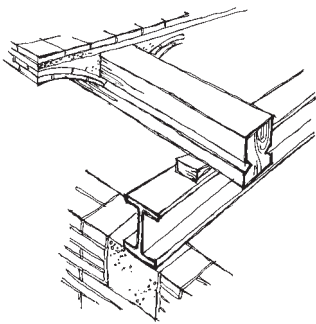
b. Suppléments de résistance pour les poutres et les poutrelles

Cette technique consiste à ajouter de nouveaux éléments qui vont collaborer à l'absorption des efforts jouant sur la poutre ou les poutrelles, lorsque le dimensionnement est jugé insuffisant ou lorsque les effets du fluage du bois ont créé des déformations excessives. Les matériaux de renfort utilisés sont généralement en bois ou constitués de profilés en acier, leur position étant latérale, inférieure ou supérieure par rapport à l'élément à renforcer. On choisit la position supérieure dans tous les cas où il y a lieu de conserver l'apparence du plancher d'origine, en présence de peintures ou de faux plafonds de valeur. La position inférieure est retenue le plus souvent pour renforcer les poutrelles quand la hauteur libre au sol admet une réduction, tandis que la position latérale est plus répandue si les poutres en bois à renforcer supportent des pans entiers de planchers de poutrelles ; il suffit alors de fixer deux éléments avec des goujons traversant la poutre. Les hypothèses pour le calcul des renforts sont diverses, selon la possibilité de collaboration résistante des éléments sous-dimensionnés ou endommagés et les déformations préalables (contre-flèches) à envisager pour obtenir leur entrée en charge conjointe avec le renfort.



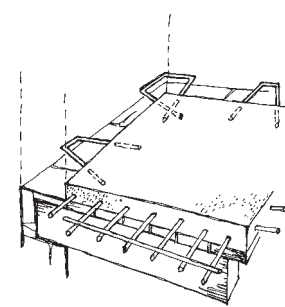
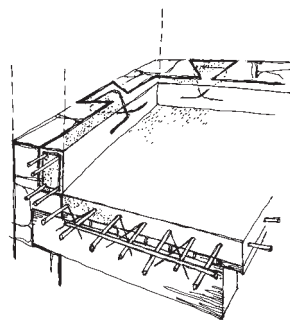
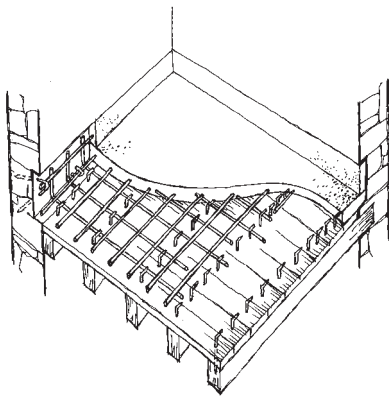
c. Montants intermédiaires

Les montants intermédiaires constituent une solution simple et efficace pour réduire les tensions de flexion introduites par les surcharges et les déformations dues au fluage du bois. On emploie des poutres en bois ou en acier, disposées en travers de la poutre à renforcer et divisant sa portée en deux ou en trois. La possibilité d'obtenir de bonnes conditions d'appui pour le montant ainsi constitué est généralement décisive dans le choix de la solution. Il faut en effet monter des murs perpendiculairement aux murs porteurs dont la résistance a faibli ou, à défaut, des piliers spécifiques avec une bonne assise sur le terrain pour pouvoir lui transférer les charges correctement.



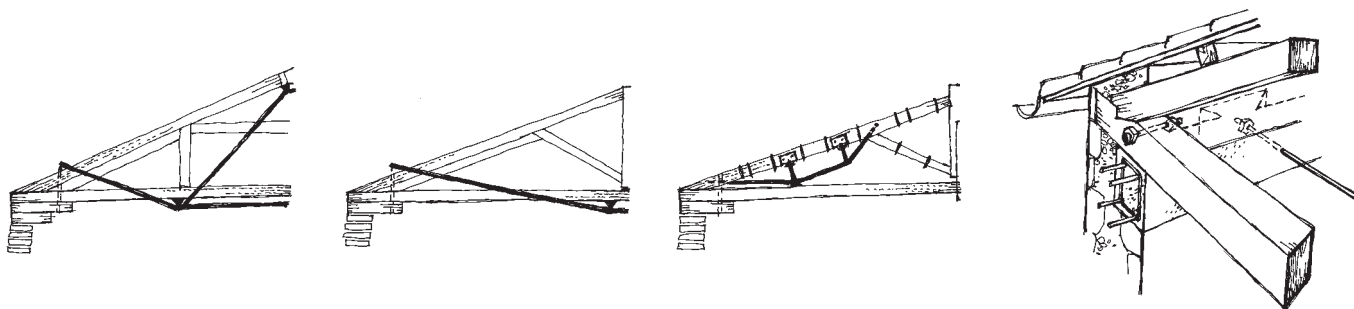
d. Pose additionnelle de dalles en béton armé

La pose additionnelle de dalles en béton armé, raccordées aux poutrelles en bois des planchers, est l'une des solutions les plus courantes aujourd'hui dans les interventions de réhabilitation de bâtiments. Le principe réside dans la transformation des poutrelles d'origine en poutres mixtes, bois et béton, et offre la possibilité de distribuer les tensions de la flexion de manière coplanaire dans toutes les directions du plan du plancher en augmentant la rigidité globale de la construction par la liaison de la nouvelle dalle dans l'épaisseur des murs et sur tout le périmètre, ce qui améliore aussi la résistance au séisme. Par ailleurs, le béton ajouté améliore aussi l'isolation acoustique du plancher. L'élément le plus critique de cette solution est celui de la liaison de la nouvelle dalle avec le mur, laquelle va dépendre des caractéristiques de rigidité, de cohésion et de percement des murs, ces caractéristiques étant très variables et imprévisibles.



e. Interventions spécifiques sur les ossatures et les fermes des couvertures

Alors que, selon l'état de ces éléments, il est généralement conseillé de les remplacer, dans la mesure où ils sont les plus exposés aux effets de l'humidité, il arrive aussi que l'on préfère envisager de les renforcer. C'est le cas lorsque leur état général le permet, selon leur importance ou leur intérêt fonctionnel. Bien entendu, le remplacement fonctionnel des appuis et leur régularisation par une disposition, si possible, sur un linteau de décharge rigide pour distribuer au mieux les charges transmises aux murs sont des opérations souvent nécessaires et recommandables. Pour le renfort des paires, tirants et contre-fiches, que l'on ne veut pas masquer, on emploie de plus en plus des armatures postcontraintes pour compenser les tractions ou créer de nouveaux équilibres de forces.

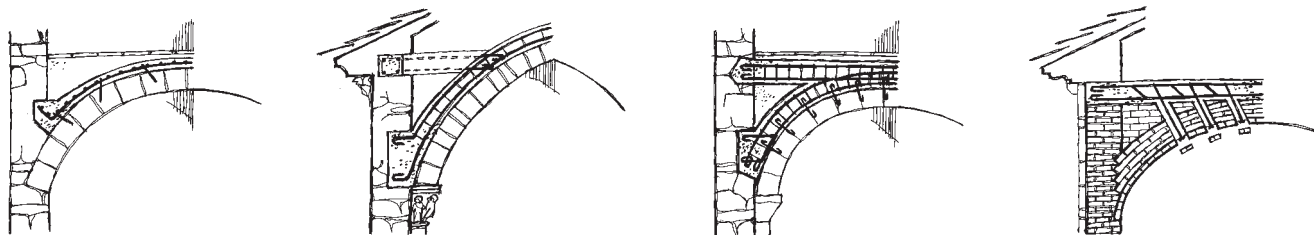


8



f. Interventions spécifiques sur les arcs, les voûtes et les coupoles

Certaines solutions applicables au renfort des planchers intéressent aussi les arcs, les voûtes et les coupoles. Ainsi les tirants métalliques interviennent-ils très souvent pour étayer les arcs et les voûtes ; on les placera sur les parties tractées de l'extrados. Les arcs peuvent élargir leur chant résistant au moyen de barres d'acier introduites, en guise de taxidermie, à partir de l'intrados. Sur certaines voûtes surbaissées, les chaînages périphériques en acier ou en béton armé absorbent les poussées créées au niveau du soubassement. Quant aux dalles en béton armé, elles peuvent renforcer les voûtes et les coupoles en les connectant sur l'extrados. Il convient néanmoins de s'interroger dans chaque cas sur l'intérêt de ces solutions, comparées à d'autres qui préservent la méthode constructive d'origine, et d'exiger comme condition sine qua non la réversibilité de l'intervention.





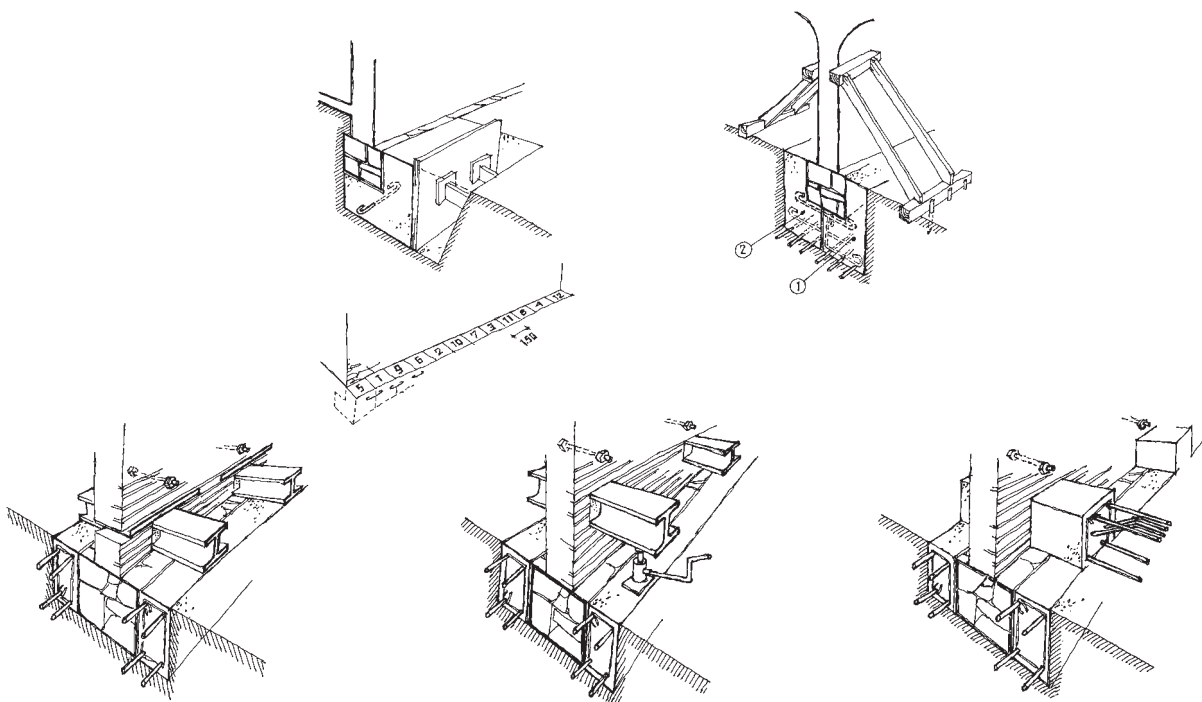
4. Interventions dans les fondations

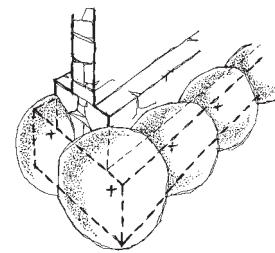
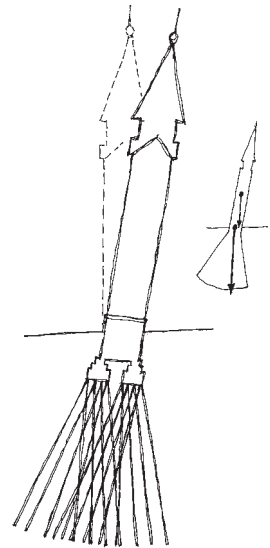
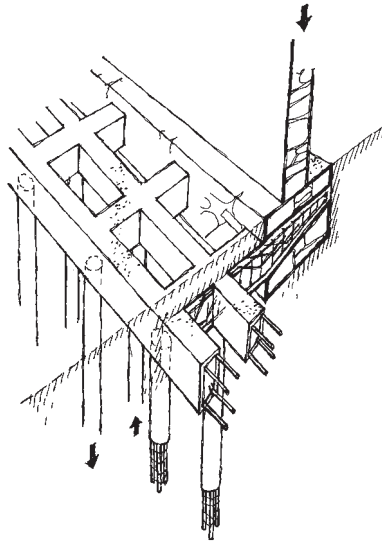
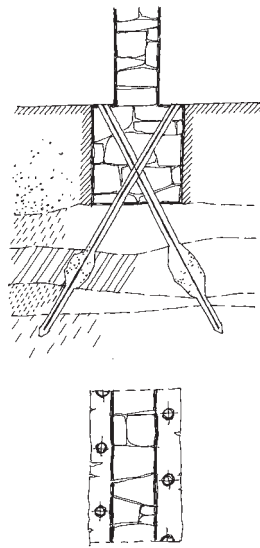
La décision quant au type d'intervention à entreprendre quand un bâtiment fait l'objet de problèmes découlant de mouvements du terrain requiert une connaissance du type ainsi que des caractéristiques des fondations du bâtiment, une phase de suivi de l'activité des lésions, et une autre d'information sur les caractéristiques géotechniques du terrain jusqu'à une profondeur suffisante. Ce n'est qu'après avoir obtenu l'ensemble de ces données et après cette phase d'analyse que doit être envisagé le type d'intervention à entreprendre. Ce sera précisément la nécessité ou non d'entreprendre telle ou telle action qui fera des conditions de charge de la partie solide des fondations originales ou d'amélioration du terrain l'une des décisions les plus importantes à prendre dans cette phase initiale.

Lorsque les fondations du bâtiment sont de type superficiel, ce qui constitue le cas le plus fréquent, le système le plus habituel de reprise est celui qui consiste à placer en-dessous un support un peu plus large compacté à la partie solide des fondations préexistantes. Il faut définir dans chaque cas, en fonction des caractéristiques du terrain, la fondation à renforcer, la profondeur et la largeur du nouveau support, ainsi que la longueur des tranchées d'excavation effectuées sous les fondations préexistantes.

Actuellement, il est de plus en plus fréquent d'utiliser des micro-pieux disposés certains verticalement et d'autres inclinés, qui englobent un plus grand volume de terrain afin d'absorber les efforts à la base des fondations, utilisant celles-ci comme un ensemble général.

Par contre, les systèmes fondés sur l'augmentation de la largeur de la base des fondations sont plus rares, à cause, en particulier, de la difficulté d'absorber les efforts de cisaillement au niveau des interfaces entre les nouvelles et les anciennes fondations. De la même manière, les systèmes qui utilisent des pieux conventionnels, du fait de l'énorme outillage que cela requiert, ou ceux qui visent à l'amélioration des terrains par injection de produits chimiques, valables seulement dans certains types de terrains d'une perméabilité adéquate, sont aussi inhabituels.





Références

Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (A.N.A.H.). *Les planchers anciens*, éditions du Moniteur, 1979, Paris

Baglioni, A., Guarnerio, G. *La ristrutturazione edilizia*, éditions Hoepli, 1980, Milan

Di Stefano, R., *Il consolidamento strutturale nel restauro architettonico*, Edizioni Scientifiche Italiane, 1990

Divers auteurs. *Il restauero delle costruzioni in muratura. Problema metodologi ed tecnica di consolidamento*, éditions Kappa, 1981, Rome

Divers auteurs. *Manual de diagnosi i intervenció en sistemes estructurals de parets de càrrega*, Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes tècnics de Barcelona, 1995, Barcelone

Divers auteurs. *Tratado de rehabilitación, Tome 1: Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales*, Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid, éditions Munilla-Ileria, 1998, Madrid

Galloni, F., ED. *Consolidamento e recupero dell'architettura tradizionale: degli interventi singoli agli interventi d'insieme urbano*, ASS.I.R.CO IV Congresso Nazionale, éditions Kappa, 1992, Rome

López Collado, G. *Ruinas en construcciones antiguas*, Ministerio de la Vivienda, 1976, Madrid

Mastrodicasa, S. *Dissesti statici delle strutture edilizie*, éditions Hoepli, 1978 (6e édition), Milan

Mele, M. *Esempi di intervento per la riparazione e il rafforzamento di edifici di abitazione. Prescrizioni per l'edilizia nelle zone sismiche*, conférence au congrès ASS.I.R.CO, 1980

Munafò, P. *Recupero dei solai in legno*, éditions Dario Flaccovio, 1990, Palerme

Pasta, A. *Restauro antisismico*, éditions Dario Flaccovio, 1992, Palerme

Rocchi, P. *Progettare il consolidamento*, éditions Kappa, 1983, Rome

Consolidation et traitement des fondations. Expériences égyptiennes

Wahid EL-BARBARY

Architecte

Directeur général du Secteur de Projets du Conseil suprême
des Antiquités, Égypte

Toutes les structures d'ingénierie sur le sol, y compris les remblais de terre, les barrages (aussi bien en terre qu'en béton), les bâtiments ou les ponts comportent deux parties, la partie du dessus, ou superstructure, et la partie du dessous, ou fondations.

La définition des fondations est la suivante : élément d'interface situé entre la superstructure et la terre ou les roches qui se trouvent en-dessous.

L'ingénierie de fondations est l'art et la science qui consiste à appliquer les capacités ainsi que les principes de l'ingénieur aux mécaniques du sol pour résoudre le problème de l'interface. Elle concerne aussi les solutions aux problèmes de soutènement des masses de terre par plusieurs types d'éléments structuraux tels que les murs de soutènement ou les palplanches.

L'ingénierie de fondations est aussi l'art et la science d'utiliser les capacités ainsi que les principes de l'ingénieur aux mécaniques des sols pour préparer des réponses adaptées aux modifications des conditions de géométries et de charges que peuvent entraîner les masses de terre.

On doit remarquer, enfin, que l'ingénierie de fondations a été définie plus brièvement comme étant l'art et la science d'utiliser les capacités et les principes de l'ingénieur aux mécaniques des sols.

Les conditions du sol sont l'une des causes principales des désordres dans les structures de maçonnerie, liées aux modifications des propriétés du sol avec le temps, comme par exemple l'augmentation des niveaux de teneur en eau du sol. Il est aussi largement reconnu que les dommages structurels dus aux tremblements de terre sont très influencés par les conditions du sol. En général, l'amplitude et la durée des tremblements de terre dépendent de la profondeur ainsi que de l'état, plus ou moins meuble, du sol sur le site. L'ingénieur doit donc obtenir suffisamment d'informations pour évaluer la capacité de portance des charges ainsi que l'amplification dynamique caractéristique du sol. Pour des sites présentant des dangers géologiques importants, tels que les sols susceptibles d'affaissements graves, les sols extra-sensibles, ou les sols ayant une grande probabilité de liquéfaction, une investigation géotechnique spéciale est nécessaire. Dans certaines circonstances, cependant, il peut être approprié de mener des recherches sismologiques et géotechniques qui vont bien au-delà des conditions minimums imposées par le code de la construction. Cela peut être le cas, par exemple, lorsque des amplifications des mouvements du terrain dues aux conditions du site ou aux effets de l'interaction terrain-structure sont



considérées comme pouvant jouer un rôle important dans le comportement de la structure qui fait l'objet de la recherche. En outre, une investigation géotechnique peut être entreprise pour prendre des mesures exploratoires ou curatives.

On peut faire une distinction entre les différents types de fondations utilisés pour supporter les bâtiments :

- ▶ Les fondations peu profondes (les semelles ou empattements) telles que les fondations continues sous les murs (la largeur de la fondation étant un peu plus importante que celle du mur qu'elle supporte), utilisant généralement des pierres et du mortier destinés aux fondations de construction ;
- ▶ Les fondations profondes (pieux, pilotis, piles, piliers ou fondations à caisson) qui sont utilisées lorsque la résistance (c'est-à-dire la capacité de portance) du sol n'est pas suffisante pour supporter l'ensemble de la structure extérieure. Il existe de nombreux types de fondations profondes depuis les fondations très anciennes utilisant des pierres et des mortiers jusqu'aux piliers de bois, tout particulièrement lorsque l'eau est très proche. La capacité des fondations, dans ce cas, est la somme des capacités latérales et de la capacité locale.

Choisir une méthode pour consolider et traiter les fondations d'un bâtiment vieux ou traditionnel dépend de la connaissance des raisons d'origine de la dégradation : affaissement, augmentation des charges, modification de la géométrie de la structure, tremblement de terre, explosion, changement du niveau de l'eau et/ou actions chimiques. Nous considérons que le traitement des fondations doit suivre les recommandations indiquées ci-dessous :

- ▶ Réalisation d'études géotechniques pour le sol des fondations, inspection et diagnostic des fondations, et connaissance de la situation ainsi que de l'état du moment. Le choix de la méthode ou du renforcement dépend du rapport des experts géotechniques et de leurs recommandations ;
- ▶ Le renforcement des fondations souterraines ne doit pas nécessairement conserver le même type de construction que la partie supérieure de la structure.

De nombreuses méthodes existent pour renforcer les fondations :

- ▶ Consolidation des fondations préexistantes ;
- ▶ Utilisation de micro-piles ;
- ▶ Renforcement du sol en utilisant des solutions modernes.

Renforcement des fondations préexistantes

L'une des méthodes consiste à consolider et étayer les fondations existantes en leur ajoutant une masse supplémentaire, en fixant la nouvelle masse aux vieilles fondations au moyen de tenseurs d'acier, de boulons d'ancrage et d'autres types de lien, et en les attachant ensemble afin de créer un système de fondation tel que l'ensemble ne pourra plus se déplacer latéralement. Pour renforcer

les fondations d'un mur ancien, on commence par déterminer le poids de la structure (pierres, matériaux de remplissage, etc.) ainsi que la portance du sol des fondations. Si les résultats montrent que la dimension des fondations existantes n'est pas suffisante pour supporter les structures dans des conditions de sécurité réalistes, il faut augmenter la surface des fondations. Les fondations supplémentaires devront être reliées à l'ancienne partie par des barres, des câbles, etc. comme indiqué ci-dessus.

Avant d'entreprendre la consolidation des vieilles fondations, un système complet de renforcement provisoire doit être fait pour conserver la stabilité du mur et de la structure.

Le concept de consolidation et d'étayage des fondations existantes peut consister à ajouter une masse supplémentaire quand il n'y a pas de problème d'affaissement (roche dure). La masse peut alors être construite sur le côté des fondations existantes ; les nouvelles masses sont reliées aux anciennes fondations en utilisant des tendeurs en acier, des boulons d'ancrage ainsi que d'autres types de lien, puis elles sont attachées afin de créer un système de fondation tel que l'ensemble ne pourra plus se déplacer latéralement.

L'action qui consiste à agrandir les fondations est plus efficace lorsque l'on élargit le radier au-delà du bord externe de la construction, car ainsi la pression des charges transférées s'étendra sur une plus grande largeur d'une strate plus profonde et plus résistante du sol. Utiliser un travail à l'épaulée peut représenter la seule solution fiable lorsqu'il n'est pas possible d'arrêter l'affaissement d'une autre manière ; toutefois, cela doit être considéré comme la dernière solution. Celle-ci, quand elle est adoptée avec des fondations superficielles, peut en effet occasionner des problèmes au cours de la phase de perçage, car alors le sol peut s'affaisser pendant les travaux puisque certaines parties sont étayées alors que les autres ne le sont pas et reposent toujours sur le sol déformé.



Utilisation de micro pieux pour consolider les fondations de monuments historiques

Lorsque le sous-sol a une capacité de portance insuffisante et/ou que le terrain plus résistant est situé à une profondeur importante, on peut utiliser des pilotis, des pieux, des micros pieux ou des fondations profondes pour renforcer la stabilité. Une autre solution consiste à utiliser une technique moderne pour consolider les vieilles structures.

L'utilisation des micros pieux constitue l'un des segments de plus en plus répandus dans les fondations profondes de nos jours. Aussi connues sous le nom de *pin piles* ou de mini-piles, les micro pieux sont de petit diamètre, en forme de tuyaux d'une grande capacité. Ils sont tout à fait indiqués en courtes longueurs filetés et installés grâce à différentes techniques de forage.

L'addition de mortier et de barres filetées renforce le pieux pour la résistance latérale, les charges de traction ainsi que de compression. Les micros pieux peuvent remplacer les piles conventionnelles dans la plupart des circonstances, et elles sont tout particulièrement économiques là où il y a des conditions de sol difficiles (dans les conditions de sols de rochers ou comportant des cavités) ou lorsque l'accès ou encore l'espace de travail est difficile ou limité, comme cela peut se produire dans les remises en état des bâtiments à la suite de tremblements de terre. Les micros pieux sont posés tout à fait comme des tirants ou des « clous de sol », en utilisant des plateformes de forage rotatif ou à percussion. Du fait de leur petite taille, une grande variété de techniques de forage peuvent être employées plus économiquement, ce qui rend leur

utilisation si attrayante : trépan de forage, tiges à percussion, *down-the-hole-hammer*, *hollow grouting drill* (Titan), etc. Les micros pieux sont largement acceptés par les ingénieurs et les concepteurs qui remplacent actuellement les pilotis traditionnels par des micros pieux, au bénéfice des propriétaires.

Renforcement du sol en utilisant des solutions modernes (Exemple du complexe Qalawoon)

Du fait de l'élévation du niveau de l'eau souterraine, celle-ci se déplace continuellement et emporte avec elle les particules du sol, ce qui entraîne la création de nombreux trous ou cavités dans le sol, qui entraînent à leur tour un comportement hétérogène du sol. Pour avoir un sol consolidé avec une bonne capacité de portance et une section homogène, il faut mettre en place un système d'écoulement fixant aussi le niveau des eaux souterraines afin de stopper les courants.

Ensuite, le processus d'injection du terrain prend place, tout d'abord en forant le sol aux niveaux spécifiés puis en insérant une tuyauterie à soupape qui permettra d'injecter le matériau de cimentation à une pression qui n'excédera pas deux bars.

Le sol est injecté avec un mélange constitué de 1 partie de ciment, pour 4 parties d'eau et 0,50 partie de bentonite. Après une période de 24 heures, une injection finale peut être faite avec un taux de ciment supérieur ainsi que des additifs Complast 431 pour donner un coulis plastifié qui permettra d'obtenir un sol ayant la capacité de portance requise.



Aspects technologiques et structuraux dans la conservation de la vieille ville d'Acre

Cet article traite des aspects technologiques et structuraux de la conservation de vestiges de bâtiments de la vieille ville d'Acre (Akko en hébreu). Le concept de base est la conservation authentique au moyen de la préservation des matériaux et des façades d'origine sans déranger la vie quotidienne dans la ville. L'information qui est présentée ci-dessous provient des études d'ingénierie physique qui ont été menées dans la ville au cours de la dernière décennie.

Le délabrement des constructions et la dégradation matérielle

Le **délabrement** est l'état dans lequel le bâtiment a partiellement ou complètement perdu sa capacité de portance et qu'il est susceptible de s'effondrer partiellement ou entièrement. Le délabrement est habituellement marqué par des causes telles que des fissures, des écroulements, des écrasements, des effritements ainsi que la perte ou la déformation d'éléments. La **dégradation** est la détérioration ainsi que l'érosion des matériaux, condition qui mène habituellement à la réduction de leur résistance et à l'augmentation de leur fragilité et de leur porosité. Le processus par lequel les matériaux sont perdus provient de l'action physique et chimique, et cela commence en général par l'extérieur et se propage ensuite vers l'intérieur.

Les mécanismes de délabrement et de dégradation sont déterminés par un certain nombre de facteurs : l'absence d'entretien correct, l'absence de connaissances scientifiques *ad hoc*, l'utilisation d'une construction au-delà de ce que l'on peut en attendre, les imperfections de la conception originale et l'introduction de nouveaux éléments qui n'avaient pas été prévus à l'origine. Tous ces facteurs mènent à une réduction de la force structurale, en d'autres termes à la réduction de la capacité de portance, parallèlement à l'augmentation des effets des actions impliquées. Trois facteurs concourent ici : le type d'action, la qualité des matériaux et le type de structure. L'action impliquée peut être une sorte d'action mécanique dynamique ou statique, ou une action physico-chimique liée à l'atmosphère et à l'environnement. La résistance des matériaux est affectée par le climat et l'érosion du fait de processus physico-chimiques. La dégradation est liée aux éléments de l'environnement naturel tels que l'humidité, la pluie, les fluctuations de température ; et à des facteurs tels que la circulation (automobile), la pollution et le manque d'entretien qui accélèrent aussi les processus naturels. La dégradation peut être chimique, physique ou biologique et elle est en rapport avec les facteurs environnementaux, avec les

Ofer COHEN
Ingénieur
Autorité des Antiquités d'Israël, Israël

Yael F. NA'AMAN
Architecte
Département de la Conservation de l'Autorité des Antiquités d'Israël, Israël



La vieille ville d'Acre (Israël)

caractéristiques des matériaux de construction et avec les éléments spécifiques qui protègent les bâtiments (par exemple les toitures et les canalisations d'écoulement). Le comportement structurel dépend pour l'essentiel du type de matériaux utilisés, de la forme et de la taille de la structure, des connexions entre les éléments ainsi que des conditions environnementales qui entourent le bâtiment. Le délabrement est causé par une augmentation de l'action mécanique et une réduction de l'efficacité structurale, que ce soit à cause de phénomènes naturels ou comme résultat d'une action causée par l'homme. Lorsque tous ces événements se produisent sans contrôle soigneux, ils peuvent avoir un impact négatif sur le bâtiment (Crocchi 1998 : p. 41-46).

La vieille ville d'Acre a été construite avec des maçonneries de pierres de grès dunaires appelées *kurkar* (murs et voûtes) solidement maintenues entre elles par des matériaux de liaison à base de chaux, et du bois qui était utilisé dans la toiture, ainsi que les portes et les fenêtres. D'autres matériaux étaient aussi utilisés comme par exemple du calcaire dur (pour les degrés du porte-à-faux, le dallage dans les espaces publics, les ouvertures des fenêtres ainsi que les éléments de décoration) et du

marbre. Dans les périodes récentes, des matériaux tels que des pavements de granito et du béton peint, des poutres d'acier, des tuiles de Marseille et, bien évidemment, du béton ont été utilisés. Ces dernières années, nous avons été les témoins de l'utilisation d'une grande variété de matériaux modernes, parmi lesquels des revêtements, du placoplâtre, de l'aluminium et de la céramique. Les problèmes structuraux les plus communs de la vieille ville sont concentrés dans les murs, les voûtes ainsi que les plafonds des constructions. Chacun de ceux-ci est caractérisé par des problèmes qui ont leur origine dans les techniques de construction, la qualité des matériaux de construction, les facteurs de destruction de la construction ainsi que les facteurs de dégradation des matériaux.

La caractéristique des processus de désintégration de la construction

Deux facteurs sont en train de détruire les bâtiments dans la vieille ville d'Acre : (1) la dégradation des matériaux due à l'érosion qui est la conséquence de processus naturels ; et (2) le délabrement suite à l'intervention humaine. Le processus naturel de la dégradation des matériaux est influencé par un niveau d'humidité et de moisissure tout particulièrement élevé, de même que par la cristallisation du sel, les propriétés de l'air, les caractéristiques du terrain, l'eau (les précipitations et la proximité de la mer), la température et l'intervention humaine avec un entretien impropre. Le délabrement causé par l'intervention directe de l'homme est un lieu commun, par exemple : les actions de rénovation dans lesquelles des matériaux mal adaptés ont été utilisés ; le démantèlement de parties de la construction pour adapter l'espace construit aux besoins de l'usager ou dans le but de nettoyer une zone nécessaire pour une nouvelle construction, ou encore afin de créer de nouveaux itinéraires d'accès ou d'améliorer ceux qui existaient ; le démantèlement d'une partie d'une structure afin de la mettre en usage secondaire dans un autre endroit ; ou le démantèlement dans le but d'écarter un danger immédiat.

Un schéma du processus de désintégration des bâtiments comprend la dégradation prolongée des solives des plafonds au dernier étage jusqu'à leur effondrement, le processus accéléré d'écroulement des murs aussi au dernier étage et des voûtes au rez-de-chaussée ainsi que la désintégration continue des murs extérieurs du bâtiment.

1. Dans le sillage de l'effondrement d'un plafond de bois au dernier étage, les murs demeurent debout, hauts et fins par rapport à l'environnement immédiat.

Le danger dans cette situation est que la stabilité des murs soit à son tour minée, ce qui aurait pour conséquence la chute de pierres ou l'effondrement de tronçons du mur.

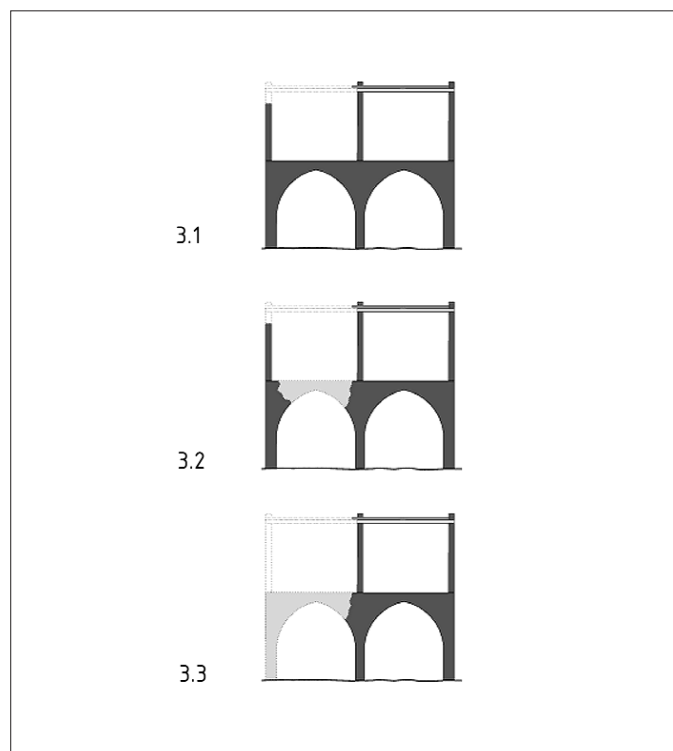
La solution dans ce cas consiste à stabiliser les vestiges en créant un élément plat sur le haut des murs et/ou un support

ancré dans la voûte.

2. L'effondrement du plafond de bois au dernier étage et de la voûte au rez-de-chaussée, et la désintégration partielle des murs.

Dans ce cas, les vestiges des murs apparaissent élevés par rapport à leur environnement immédiat et les vestiges des voûtes sont instables.

La solution à cela consiste à restaurer la fonction spatiale au rez-de-chaussée et/ou à soutenir les vestiges sur le sol ou sur



Les problèmes structuraux.



Désordres aux murs.

une structure adjacente.

L'effondrement du plafond de bois au dernier étage et de la voûte au rez-de-chaussée, et la désintégration des murs extérieurs.

Dans cette situation, une sorte de moignon protubérant demeure, et ce vestige n'est pas stabilisé par la voûte. La solution requiert la stabilisation du vestige de la voûte ou l'écartement contrôlé des parties dangereuses.

Le schéma de désintégration décrit ci-dessus est aussi valable dans les bâtiments de trois étages dans lesquels il y a deux plafonds de bois soutenus au-dessus d'un étage voûté.

Le facteur le plus significatif et le plus commun dans les processus de désintégration dans la ville est l'inclinaison des murs, en d'autres termes leur déplacement par rapport à la verticale. On peut dire que tous les cas de désintégration des bâtiments dans la vieille ville d'Acre proviennent de l'absence d'un entretien adapté ou bien qu'ils sont le résultat du délabrement physique. Ces facteurs sont la cause d'une réaction en chaîne de délabrement et de dégradation prolongés ainsi que d'une constante détérioration des conditions physiques du bâtiment.

Les murs à double face

La plupart des murs au rez-de-chaussée à Acre sont construits de deux rangées de pierres avec un fourrage de *debesh* entre les deux. La construction a été effectuée en rangées horizontales : tout d'abord, une rangée de pierres des faces externes du mur était posée et l'espace entre elles était rempli de *debesh*, puis la deuxième rangée de pierres était posée et ainsi de suite, une rangée sur l'autre. Les faces externes des murs ont été construites de maçonnerie de pierres taillées *kurkar* mais les réparations ont été faites avec des pierres qui n'étaient pas taillées. Le cœur des murs consistait en un fourrage de petites pierres et de matériaux de liaisonnement. Dans la construction de la ville, un grand usage a été fait de deux types de matériau de liaisonnement, l'un à base de chaux et l'autre à base de terre.

La plupart des murs ont 80 à 120 centimètres d'épaisseur. Leur première fonction est de supporter le poids des étages voûtés et de diriger les charges des murs hauts (larges de l'épaisseur d'une pierre) des étages supérieurs. L'impression initiale que l'on a quand on regarde les murs, c'est qu'ils sont homogènes. Toutefois, lorsque l'on observe le matériau de liaisonnement qui s'effrite dans des zones où le vide du mur a été endommagé ou dans les cas de dégradation, une image différente est révélée : le matériau de construction des murs de même que la masse de la construction sont en train de subir un processus de désintégration. On peut classer les murs de la vieille ville d'Acre en quatre catégories :

Type 1. Construction régulière utilisant des pierres qui ont cinq faces taillées. La hauteur de la pierre et l'assise sont de 45 centimètres, les pierres ont de 50 à 100 centimètres de longueur et la largeur du joint entre deux rangées de pierres est de 5 à 10 millimètres. En général, on peut dire que la qualité de ce type de mur est tout à fait bonne.

Type 2. Construction régulière utilisant des pierres qui ont cinq faces taillées. La hauteur de la pierre et l'assise sont de 18 à 37 centimètres, les pierres ont de 18 à 45 centimètres de longueur et la largeur du joint entre deux rangées de pierres est de 5 à 10 millimètres. La qualité du mur est habituellement bonne.

Type 3. Construction régulière utilisant des pierres grossièrement taillées. La hauteur de la pierre et l'assise sont de 23 à 40 centimètres, les pierres ont de 18 à 60 centimètres de longueur et la largeur du joint entre deux rangées de pierres est de 5 à 10 millimètres. En général, on peut dire que la qualité de ce type de mur est moyenne.

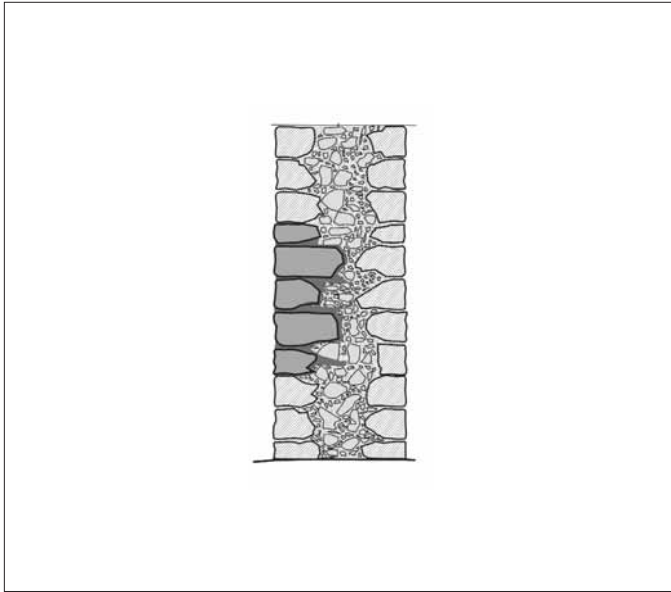
Type 4. Construction irrégulière utilisant des moellons. La taille et la forme des pierres varient et l'assise n'est pas de longueur uniforme. La largeur des joints n'est pas uniforme non plus et les joints verticaux s'étendent fréquemment sur plus d'une rangée. La qualité de ce type de mur est faible. Les murs tels que ceux-ci sont principalement des murs de réparation ou des murs de soutènement.

La plupart des problèmes structuraux des murs impliquent : la perte de pierres dans les surfaces externes des murs ; des défauts structuraux dans les surfaces externes ; des fissures ; des défauts dans le plan du mur qui sont principalement caractérisés par des glissements horizontaux, des vides dans le cœur du mur ou des pertes de matériaux de liaisonnement à l'intérieur du mur. Ces problèmes sont causés par l'utilisation de matériaux de qualité inférieure, l'absence de finition correcte de la partie supérieure des murs, des infiltrations d'eau, l'effritement des matériaux de liaisonnement, le délabrement mécanique de même que l'usure et l'érosion du cœur des murs menant à la formation de vides à l'intérieur. L'usure se produit fréquemment lorsque les matériaux de liaisonnement s'effritent petit à petit et partent par les fissures et les joints. En outre, on doit ajouter à ce tableau l'absence d'entretien actuel qui accélère les processus de vieillissement naturel.

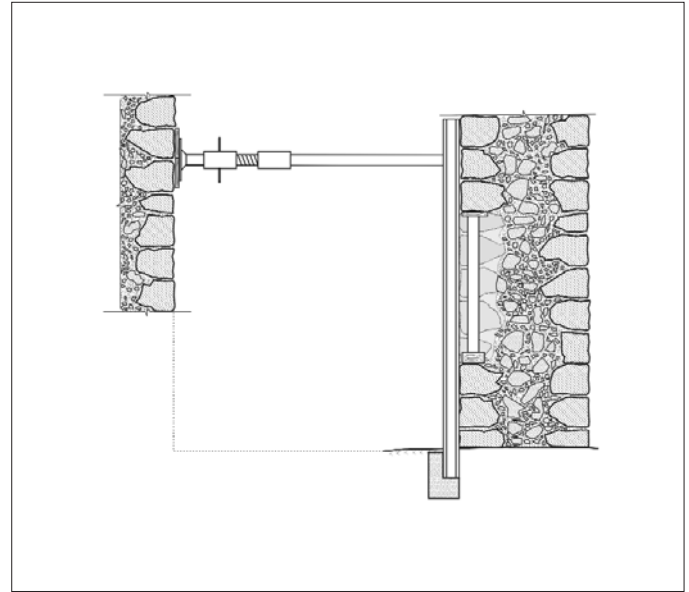
La perte de pierres

Un certain nombre de facteurs entraînent une absence de pierres de la surface externe du mur :

1. Le délabrement mécanique direct d'une ou de plusieurs pierres qui entraîne la perte de celles-ci. Un tel délabrement a en général pour résultat que d'autres pierres tombent aussi du mur. Une ou plusieurs pierres souffrant d'une usure intense



Restauration de la stabilité locale par la construction d'une maçonnerie de pierres.



Restauration de la stabilité extensive par l'utilisation de supports.

feront qu'une ou plusieurs autres pierres tomberont de la rangée supérieure. Ce processus ne s'arrêtera que lorsque la zone délabrée sera stabilisée.

2. Une mauvaise qualité de construction du mur. Dans ce cas, la surface interne qui est en contact entre les différentes rangées est plutôt fine, la profondeur des pierres est insuffisante et elles ne sont pas suffisamment ancrées dans le mur. De ce fait, une pression minimum entraînera le détachement d'une ou plusieurs pierres et leur chute.
3. L'effondrement d'une partie de la surface externe du mur suite à la déformation causée par la dilatation.
4. Le déplacement du mur ou d'une partition perpendiculaire au mur entraînera le délabrement de la totalité du mur, la perte de pierres et une dégradation accélérée.

L'objectif lorsque l'on traite le problème des pierres manquantes consiste à restaurer la capacité de portance d'origine du mur, à intégrer la surface externe comme partie inséparable du mur, et à rénover le système constructif d'origine.

Des solutions possibles dans ce cas peuvent être les suivantes : (1) une restauration limitée permettant d'obtenir une relative stabilité dans la région ; (2) une restauration plus extensive de la stabilité par l'utilisation de supports. La stabilisation en complétant la maçonnerie de pierres est une solution préférable aux effets de la conservation du bâtiment. L'installation de supports est souhaitable comme phase intermédiaire pour le processus de stabilisation ou bien dans des cas dans lesquels la déformation du mur l'exige.

La déformation structurelle

Cet état est caractérisé par une section du mur qui apparaît comme une protubérance par rapport à la ligne originale de la construction. Ce phénomène est le résultat d'un certain nombre de mécanismes de destruction :

Des fissures et/ou des vides à l'intérieur du mur créant un excès de charge sur la surface externe, ce qui entraîne la dilatation suivie de l'effondrement de la même section du mur ;

Le détachement de la surface externe du mur de son centre du fait de l'absence d'une capacité d'adhérence suffisante ;

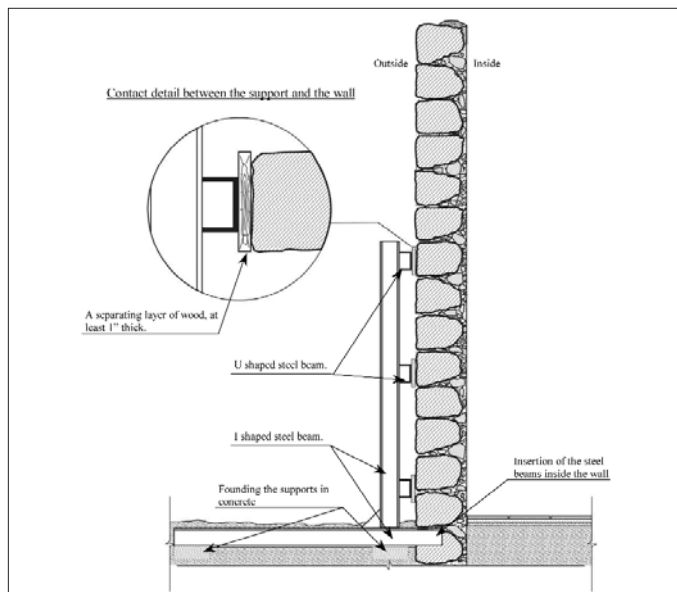
Un processus qui accélère la dilatation est l'effritement des matériaux de liaisonnement et leur chute dans l'espace situé entre le cœur du mur et la surface externe. Dans cette situation, le matériau de liaisonnement agit comme un accélérateur du processus de déformation.

L'objectif dans cette situation, comme dans la précédente, consiste à restaurer la capacité originale de portance du mur, à rattacher la surface externe du mur et à rénover le système statique original.

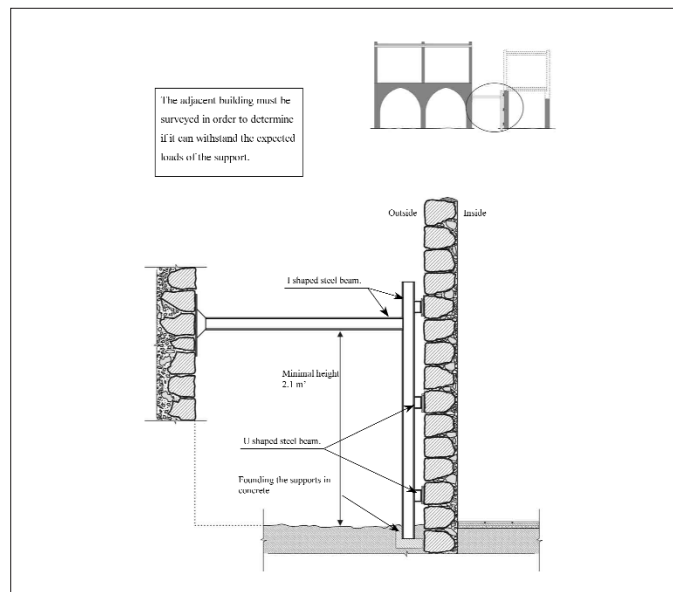
Possibles solutions : remplir les vides dans le centre du mur (injection de ciment) et rejointoyer, et installer des ancrages, ou bien démanteler la section de mur affectée afin de la reconstruire.

Les vestiges de bâtiments

La propriété qui différencie les vestiges de bâtiments des vestiges de murs est la possibilité de restaurer leur fonction spatio-structurelle. Un certain nombre de combinaisons de facteurs mènent le bâtiment à un état où il sera défini comme un vestige, par exemple : l'effondrement d'un plafond voûté dû à diverses raisons telles qu'un excès de charge ;



Support sur le sol – de l'un des côtés
(détail – couche de séparation).



Support d'une structure adjacente.

l'affaiblissement de la stabilité d'un mur par rapport à la pression latérale des voûtes ; une mauvaise mise en œuvre ; l'effondrement de l'un des murs porteurs ; l'effondrement d'un plafond de bois dû à des raisons diverses telles que l'usure naturelle ; des problèmes de moisissure concernant des poutres de bois ; un excès de charge ; la déformation d'un mur ; ou des interventions humaines telles que l'ouverture de nouveaux accès ; ou encore le déplacement d'un espace pour le bien d'une nouvelle structure. Dans toutes ces situations, l'usure accélérée du plafond ou des murs est apparente avant même l'effondrement.

L'objectif dans cette situation est de stabiliser les différents éléments structuraux et, dans la mesure du possible, de restaurer leur fonction spatiale. Dans les bâtiments qui ne sont que légèrement délabrés, il est préférable de restaurer la fonction spatiale au moyen de la reconstruction d'un plafond utilisant une technologie traditionnelle tout en remplaçant, parallèlement, les pierres manquantes. En réalité, les vestiges de bâtiment dans un état avancé de destruction ne subissent pas actuellement de processus de conservation dans la vieille ville d'Acre et ils sont soit détruits intentionnellement soit négligés.

Les vestiges de murs

Cet aspect comprend des murs de diverses hauteurs et de diverses largeurs souffrant de différents degrés de délabrement, sans la moindre possibilité de restauration de leur fonction spatiale. Un certain nombre de facteurs ou une combinaison de facteurs a mené à cette situation.

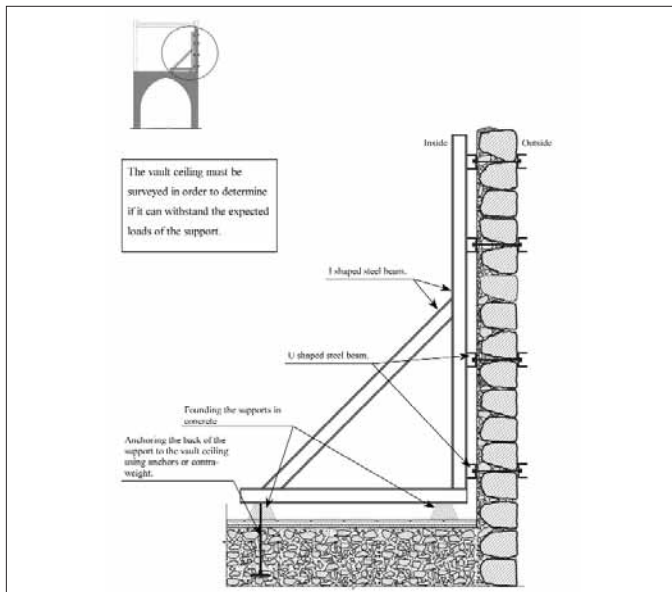
Un mur qui faisait partie à l'origine d'un bâtiment qui a été détruit

et dont il ne reste, de nos jours, aucun vestige du contexte spatial original. La qualité de la construction est un facteur significatif de la condition des murs ; lorsque celle-ci est extrêmement pauvre, on peut constater le déclin accéléré des propriétés constructives de l'élément structural ou du bâtiment dans son ensemble. Un mur qui était construit à l'origine comme un élément unique et dont une partie a été détruite par un processus naturel, tel que l'érosion de la pierre ou du cœur comme résultat du délabrement d'usure, mène à l'effondrement d'une section du mur ; la mauvaise finition de la partie supérieure du mur ou l'absence de garniture intensifie dans ce cas sa sensibilité à l'érosion ainsi que son affaiblissement. En plus de ces éléments, il faut ajouter le facteur humain qui se manifeste par la création de nouvelles approches ou de nouvelles constructions.

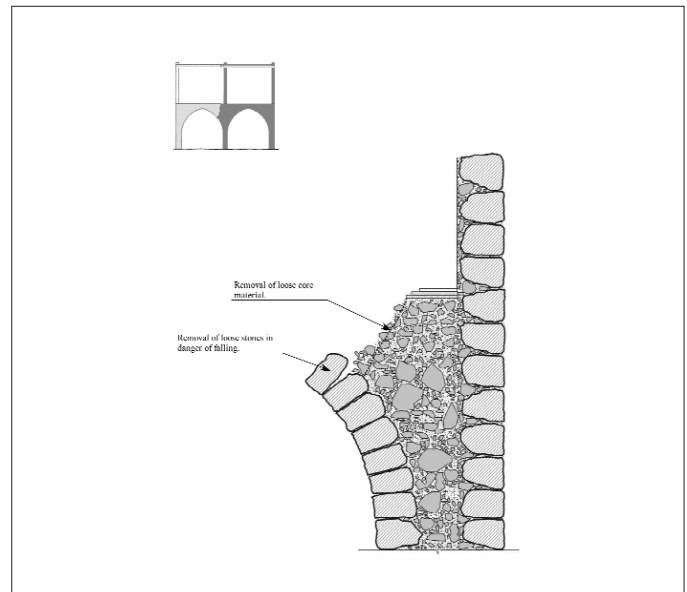
L'objectif dans ces cas-là est de stabiliser le mur, d'écarter tout danger immédiat et de s'assurer que le mur peut supporter les charges comme auparavant.

Les murs bas

Nous comprenons dans cette catégorie les murs qui ne dépassent pas 1,50 mètre au-dessus de leur environnement immédiat et qui ne représentent pas un danger immédiat. Par exemple, un mur de 1 mètre de hauteur situé sur le toit d'un bâtiment peut être considéré comme dangereux parce que sa hauteur au-dessus du sol excède 1,50 mètre. Toutefois, les vestiges d'un mur de moins de 2,50 mètres sont considérés comme stables si la hauteur du mur n'excède pas cinq fois sa largeur quand il est complet structurellement.



Support sur un étage supérieur.



Une section de vestiges de voûte avant sa stabilisation.

Les murs hauts ou les murs qui constituent un danger immédiat

Les vestiges de ces murs sont eux-mêmes hauts (murs fins qui dépassent de 1,50 mètre leur environnement immédiat), ils constituent un danger imminent et ils requièrent un support spatial temporaire ou permanent pendant le cours des travaux de conservation et de rénovation et/ou après ces travaux. Les mesures de conservation dans ces cas-là comprendront la préparation et la stabilisation du mur conformément à ses caractéristiques, en remplissant les fissures ainsi que les vides se trouvant dans la pierre, en réparant la ou les pierres usée(s), en rejointoyant et en vérifiant l'installation des supports.

Dans les murs hauts, les mesures de préparation comprendront la dépose des matériaux non stabilisés de la partie supérieure du mur, des matériaux non stabilisés et affaiblis dans les zones où le plâtre manque à l'intérieur du mur ainsi que des matériaux de liaisonnement non stabilisés des joints sur la partie externe du mur. Les mesures de conservation comprendront la stabilisation et le scellement de la partie supérieure du mur, en remplaçant le matériau de liaisonnement manquant dans les joints et le plâtre lui aussi manquant tout en créant, parallèlement, une surface redressée.

Dans les murs à double face, la préparation comprendra la dépose des pierres branlantes, des matériaux du cœur non stabilisés ainsi que des matériaux de liaisonnement effrités des joints. Les mesures de stabilisation pour ces murs impliquent le remplacement des pierres manquantes et le remplissage derrière elles avec du matériau de liaisonnement, afin de

compléter les rangées de pierres dans la mesure où cela est nécessaire, en vérifiant les joints et le scellement de la partie supérieure du mur.

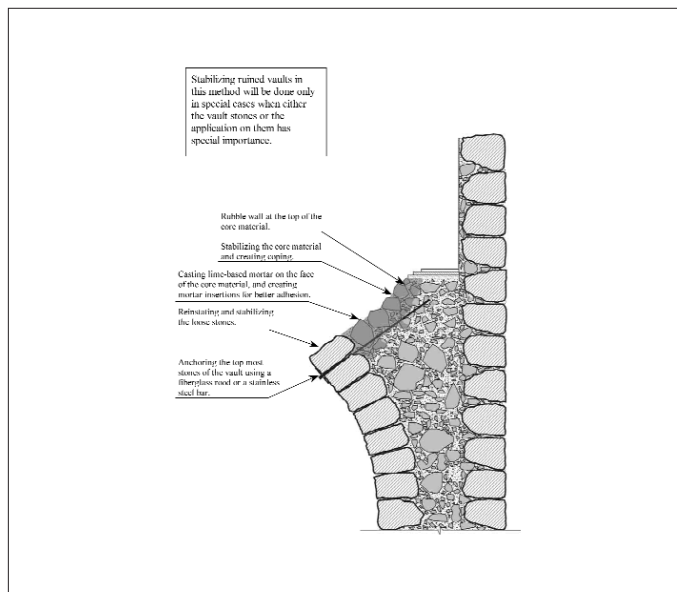
Dans les deux cas, les mesures de conservation sont nécessaires pour le remplacement des pierres érodées, pour le remplissage des vides et des fissures dans la pierre, ainsi que pour la vérification des joints comme faisant partie des mesures de stabilisation du mur.

Le support des murs hauts

Le support des murs hauts est considéré comme une mesure à court terme jusqu'à ce qu'une solution permanente soit adoptée pour stabiliser le mur. En tout cas, l'objectif préféré est une solution spatiale, en d'autres termes une solution qui complète la construction. En règle générale, la conception des supports comprendra la spécification d'une couche de bois séparant les nouveaux matériaux de la pierre.

Restes de voûte

Des sections de voûte et d'arc dans différents états de préservation font partie des vestiges des bâtiments de la ville. Les restes de voûte sont limités en taille, et le phénomène le plus commun est la « survie » du départ de voûte encore relié aux murs des montants dans la partie stable du bâtiment. Dans la plupart des cas, les vestiges de voûte constituent un danger immédiat du fait de leur hauteur et de leur emplacement au-dessus d'un passage. Le danger immédiat est que l'une des pierres tombe dans l'espace situé sous elles. Les mécanismes de destruction qui mènent à cette condition sont l'effondrement de la voûte dû à différentes raisons et/ou



Après le traitement pour stabiliser le cœur et ancrer la pierre du sommet.

interventions humaines, afin d'ouvrir des passages ou récupérer de l'espace pour une nouvelle construction, par exemple.

L'objectif dans ce cas est de stabiliser les vestiges et d'écartier tout danger imminent de chute des pierres et des autres parties de la voûte. Parfois, il est suffisant de stabiliser le centre, mais lorsque l'angle entre la pierre la plus haute de la voûte et la verticale est inférieur à 30°, cette pierre doit être ancrée à un cœur stabilisé, ou inversement elle doit être retirée pour des considérations de sécurité.

Conclusion

Les problèmes structuraux dans la vieille ville d'Acre ont été étudiés de nombreuses fois comme faisant partie des mesures actuellement mises en œuvre par l'Autorité des Antiquités d'Israël dans la ville. Leur analyse ainsi que leur compréhension nous a menés à conclure que, dans de nombreux cas, les racines du problème résident dans une construction de qualité inférieure et dans l'utilisation de matériaux eux aussi de qualité inférieure. Le facteur le plus significatif dans l'état de préservation physique est l'absence à long terme d'un entretien adapté ainsi que l'absence d'une prise de conscience des problèmes. Ce facteur a accéléré l'action des mécanismes de destruction et de la dégradation naturelle qui se produit dans la ville.

Il y a différentes manières de conserver les éléments de construction dans la ville. Choisir un traitement est un stade dans un processus méthodique et structuré qui comprend l'identification du problème, la compréhension des facteurs historiques et actuels ayant un influence sur le site, la formulation d'un concept théorique pour un traitement basé sur une perspective ouverte des aspects rencontrés

dans la conservation d'une ville historique, et la planification ainsi que la mise en œuvre des mesures de conservation utilisant les ressources disponibles pour le propriétaire et le conservateur qui travaille en son nom. En plus d'une occasion, un conservateur s'est lui-même trouvé les mains liées par des contraintes budgétaires. Les actions prises dans les immeubles résidentiels de la ville au cours de cette dernière décennie ont été déterminées pour l'essentiel par des ordres de démolition ayant pour origine l'écartement d'un danger et non par une attitude favorable à la conservation de la part des résidents ou un concept global de conservation adopté par la ville. Nous espérons que les choses changeront dans le sillage de la déclaration de la ville en tant que site du patrimoine mondial et l'approbation d'un nouveau plan maître local.

Références

- BISCONTIN G. 1998, *Compatible Materials for the Protection of European Cultural Heritage Pact 55*. Grèce.
- BREBBIA C. A. 1991, *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III*. Boston, États-Unis.
- BREBBIA C. A. 1991, *General Studies 1: Materials and Analysis*. Boston, États-Unis.
- BREBBIA C. A. 1991, *Dynamics 2: Stabilization and Restoration*. Boston, États-Unis.
- COHEN O. 2000, *General Structural Detailing for Characteristic Problems in Stone Masonry in the Old City of Acre*, thèse de maîtrise, Katholieke Universiteit. Leuven (Université catholique de Louvain), Louvain, Belgique.
- CROCI G. 1998, *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*. Grande-Bretagne.
- FEILDEN B. M. 1982, *Conservation of Historic Buildings*. Londres, Angleterre.
- GIUFFRÉ A. 1995, *Statics and Dynamics of Historical Masonry Buildings*. Rome, Italie.
- HEYMAN J. 1998, *Structural Analysis: A Historical Approach*. Cambridge, Angleterre.
- HEYMAN J. 1995, *The Stone Skeleton*. Cambridge, Angleterre.
- ISRAEL ANTIQUITIES AUTHORITY (Autorité des Antiquités d'Israël), Conservation Files Archive, Rockefeller Museum, Jérusalem, Israël.
- LOMBARDO S. 1997, *Restauro Strutturale*. Rome, Italie.
- MASTRODICASA S. 1978, *Dissesti Statici Delle Strutture Edilizie*. Milan, Italie.
- PICCIRILLI C. 1989, *Consolidamento Critico*. Rome, Italie.
- ROCCHI P. 1998, *Manuale del Consolidamento*. Rome, Italie.
- SHADMON A. 1972, *Stone in Israel*. Jérusalem, Israël.
- TASSIOS T. P. 2000, *Dimensioning of Interventions (Repairs/Strengthening) on Low-Strength Masonry Buildings*. Athènes, Grèce.
- TOMAZEVIC M. 1991, *The Strengthening of Stone Masonry Walls with Grouting*. Ljubljana, Slovénie.
- TORRACA G. 1988, *Porous Building Materials*. ICCROM, Rome, Italie.
- WEAVER M. E. 1993, *Conserving Buildings*. New York, États-Unis.

Consolidation et traitement des murs. Expériences égyptiennes

Wahid EL-BARBARY

Architecte

Directeur général des Projets de Secteur du Conseil suprême
des Antiquités, Égypte

Les murs de maçonnerie en technique traditionnelle sont en général composés de pierres naturelles ou de briques, habituellement maintenues entre elles par un mortier.

Dernièrement, de plus en plus de technologies modernes ont été utilisées pour préserver ou restaurer de vieux murs. Un grand nombre d'institutions et de groupes de travail se chargent du développement et de l'application de nouvelles technologies pour le renforcement des constructions traditionnelles. Lorsque des techniques traditionnelles s'avèrent inadéquates, la consolidation des constructions peut être réalisée par l'utilisation de n'importe quelle technique moderne pour la conservation ou la construction dont l'efficacité aura été prouvée par des données scientifiques et par l'expérience.

L'évaluation des conditions de construction existantes peut faire partie d'une inspection et d'un entretien de routine ou bien elle peut être entamée à la suite de performances non satisfaisantes, de signes de détérioration ou encore de l'identification d'un besoin d'amélioration. La procédure d'évaluation consiste en ce qui suit : investigation et recueil de données sur le site ; identification des sous-systèmes structuraux et non-structuraux du bâtiment ; tests sur le site, tests en laboratoire ; analyse de la structure ; évaluation de la performance sismique des sous-systèmes du bâtiment ; suivi de l'inspection des sous-systèmes accessibles et critiques sur le site ; préparation et délivrance du rapport final.

L'objectif de cette procédure d'évaluation est d'obtenir une compréhension complète de la composition, des conditions ainsi que de l'intégrité de la structure. Pour les structures du patrimoine, la collecte de l'information devrait être à l'origine d'une brève histoire de la structure détaillant la période et les phases de sa construction, ainsi que les dates et les détails des modifications ou des réparations structurales et non-structurales qui ont été effectuées dans la vie de la structure.

La dégradation signifie une situation dans laquelle la structure a réduit ou perdu sa capacité de portance au point d'arriver, dans des conditions extrêmes, à la rupture et à l'effondrement. Cette situation est habituellement caractérisée par des fissures, des écrasements, des détachements, des déformations permanentes ou des inclinaisons par rapport à la verticale. La détérioration ou le délabrement est une altération physico-chimique des propriétés des matériaux qui induit habituellement une réduction de la résistance, une augmentation de la fragilité et de la porosité, une perte de matériaux, commençant en général par la surface externe et se poursuivant vers l'intérieur.



L'origine des dommages et de la détérioration peut être mise en rapport avec un ou plusieurs des facteurs présentés ci-dessous :

- ▶ Les risques provenant de la conception originale de la construction ;
- ▶ Les traditions quant à la construction et aux matériaux en fonction de l'époque de la construction ;
- ▶ L'utilisation de la construction au-delà de la moyenne d'âge estimée ;
- ▶ Les erreurs et imperfections de la conception originale ;
- ▶ L'intervention de nouveaux facteurs environnementaux et sociaux.

La structure représente la partie conceptuelle de la construction qui, d'une part, transforme les actions en contraintes et, d'autre part, apporte la force. Le comportement structural dépend principalement des caractéristiques matérielles, des dimensions, des connections entre les différents éléments et des conditions des limites.

L'examen des typologies de dégradation est très important étant donné que les déformations et les types de fissure, entre autres, sont en rapport strict avec le comportement structural et avec les actions qui les causent.



Les signes visibles, dépendant des différents types de matériau et de construction, peuvent être regroupés dans les trois catégories présentées ci-dessous :

8

- ▶ Fissures dans les matériaux qui ne résistent pas aux contraintes élastiques. Ce signe est le plus fréquent dans les maçonneries qui ont une très faible résistance à la tension ;
- ▶ Écrasement d'éléments comprimés. Ce phénomène est aussi beaucoup plus dangereux que le précédent, même s'il est moins fréquent ; on le repère surtout dans les maçonneries. L'écrasement est caractérisé, selon le type de matériau, par le gonflement, le détachement de particules, l'effritement, etc. Dans la phase initiale, des microfissures parallèles à la direction de la contrainte apparaissent.
- ▶ Les déformations permanentes. Ce phénomène est tout particulièrement en rapport avec l'effet de la flexion induite par les charges excentriques ainsi que par les poussées horizontales (arcs ou autres éléments similaires) ; en outre, une composante importante peut être en rapport avec les déformations du sol des fondations. Dans les maçonneries épaisses des phénomènes de gauchissement peuvent apparaître du fait de la faiblesse des connections entre les feuilles externes et les noyaux internes. Une situation limite peut être atteinte quand se produit subitement un fléchissement latéral, ce qui est un phénomène particulièrement dangereux dans les éléments élancés.



L'observation, la connaissance de l'histoire et l'interprétation des calculs de structure (en ce qui concerne les actions possibles et l'analyse des modèles de fissures qui s'ensuivent), de même que les résultats des investigations et des systèmes de surveillance fournissent les outils nécessaires pour comprendre et interpréter de la meilleure manière possible les phénomènes qui se produisent. Toutefois, comme en médecine, un diagnostic correct et complet ne peut être obtenu que si tout est combiné avec l'intuition, l'expérience et la capacité individuelles.

L'examen de quelques cas et d'exemples aidera à mieux comprendre ce processus et à choisir le traitement adéquat entre : l'utilisation des techniques traditionnelles pour le renforcement des murs et la remise en place des parties des murs qui ont été détériorées ou qui se sont effondrées ; ou bien l'utilisation de nouvelles techniques pour le traitement des fissures et la consolidation des murs en faisant une injection de matériaux traditionnels à l'intérieur des éléments qui ont été affaiblis par la perte des matériaux de liaisonnement ; ou encore l'utilisation de tirants ou d'autres systèmes matériels pour connecter les murs entre eux ; etc.

Dans tous les cas, la prise de décision dépendra de l'analyse des résultats de l'investigation. Ceux-ci, en effet, permettront de comprendre et de quantifier l'ampleur ainsi que les causes du problème, de même que les autres déficiences qui en découlent. Par ailleurs, cette analyse aidera à établir l'urgence de la mise en œuvre du travail de restauration. Le type de travail qui aura été décidé pour remédier au problème sera la plupart du temps affecté par les conditions uniques de bâtiment particulier. Au-delà d'assurer la capacité structurale essentielle ainsi que la correction des autres problèmes qui impliquent des risques pour la sécurité immédiate, le détail des mesures est souvent significativement influencé par des considérations financières. En général, le processus d'évaluation et de diagnose mènera à l'une des actions ci-dessous :

- ▶ Non réhabilitation. La sécurité et les performances du bâtiment sont adéquates et, avec un entretien régulier et peut-être une amélioration cosmétique, ses performances devraient être satisfaisantes ou, au moins, acceptables pour une certaine période de temps.
- ▶ Une réhabilitation est nécessaire. Les problèmes de sécurité et d'utilisation sont suffisamment graves pour qu'une réparation ou une amélioration soit nécessaire, ou bien que celle-ci puisse être mieux réalisée de manière efficace à ce moment précis.
- ▶ La restauration n'est pas faisable. Les coûts de restauration dépassent les bénéfices que l'on pourrait en tirer, et une démolition du bâtiment est recommandée ou, s'il n'y a pas de risques pour la sécurité, la structure peut demeurer dans sa condition dégradée.

Exemple : Couture de mur à l'aide d'un système d'ancrage dans un bâtiment monumental. (Complexe Qalawoon)

Du fait des profondes fissures qui se trouvent dans les murs, et pour éviter les techniques de reconstruction afin de régler le problème, la solution est venue du système d'ancrage.

Le système consiste simplement en plusieurs barres d'acier inoxydable, une sorte de chaussette et une injection.

Tout d'abord, il s'agit de faire une bonne étude pour déterminer l'état des murs qui doivent être traités par un système d'ancrage

du fait de leur valeur esthétique et historique, en étudiant aussi l'accessibilité pour couder le mur fissuré et disposer les ancrages. Après la conception et le calcul, le travail de couture commence par le percement des trous aux diamètres requis et des longueurs spécifiées. Ensuite vient l'introduction des barres d'acier inoxydable dans les « chaussettes », puis l'insertion des deux éléments dans le mur.

Après l'insertion, le processus d'injection du mortier d'ancrage peut être entamé avec une pression qui ne doit pas excéder 2 bars et ce jusqu'à ce que le produit sorte du trou.

L'idée de la « chaussette » est liée au comportement de celle-ci avec le mortier de remplissage : la « chaussette », en effet, épouse la forme de la section interne du mur et se comporte avec le mur comme s'il ne s'agissait que d'un seul et même élément.

Ceci permet de résoudre le problème des ancrages longitudinaux, puis viennent les ancrages de consolidation pour couder les deux feuilles du mur.

Amélioration du comportement sismique et conservation des caractéristiques structurales

L'amélioration du comportement sismique dans l'architecture traditionnelle peut être poursuivie tout en préservant ses qualités et ses caractéristiques statiques, matérielles et constructives.

Les principes de conservation peuvent être plus facilement appliqués au moyen des techniques traditionnelles qui ont été suggérées par l'architecture historique et les traités anciens. À la lumière du débat scientifique et culturel contemporain, l'amélioration de la résistance globale du bâtiment de cette manière semble être l'approche la plus souhaitable pour préserver dans l'ensemble la conception originale de la maçonnerie. Parallèlement, le bâtiment à lui seul a une configuration statique propre qui ne doit pas être faussée. Une architecture dans laquelle le processus particulier de construction est modifié ne peut être considérée que comme une simple extériorité formaliste. Cette approche peut faire usage d'outils opératoires innovants, concrètement les Codes de pratique, qui spécifient et décrivent en détail les dispositions générales en rapport avec les réalités de la construction locale. Les Codes de pratique, méthodologiquement similaires aux Manuels de réhabilitation, proposent, au-delà d'un ensemble d'outils d'analyses de la vulnérabilité pour le bâtiment concerné, un certain nombre de contrôles, d'exemples de détails structuraux et de solutions pouvant se conformer aux caractéristiques de construction originales du bâtiment. Toutefois, tous ces contenus doivent être interprétés par le professionnel en fonction de la situation spécifique. L'intervention résultante sera certainement adéquate, étant donné qu'elle ne modifiera pas la logique propre (formelle, spatiale, matérielle) du bâtiment existant et qu'elle sera congruente avec la logique modale (en d'autres termes, le processus) qu'elle poursuit.

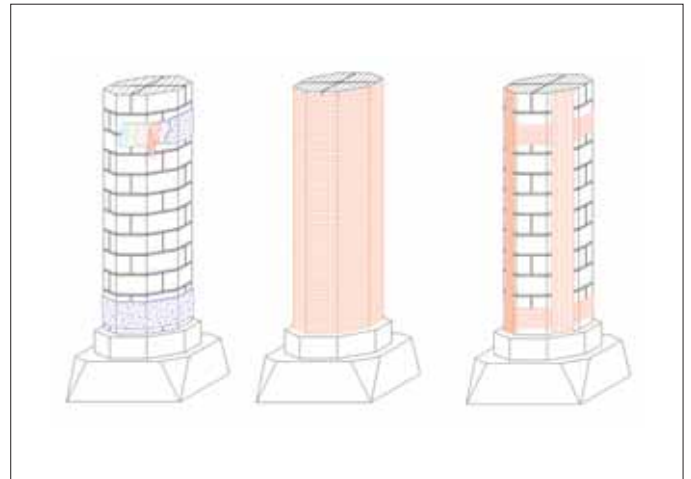
En outre, de récents tremblements de terre ont montré que certaines techniques structurelles, fréquemment appliquées au cours de ces dernières décennies, ne sont pas effectives. Par exemple, la reconstruction des toits en béton armé, l'insertion de poutres trop rigides dans la partie supérieure des murs, l'emploi de perforations renforcées plutôt que de tirants de métal, ont souvent causé des dommages plus dramatiques que les éléments d'origine. Cependant, l'emploi de techniques innovatrices ne doit pas être écarté si c'est afin d'obtenir des améliorations sismiques ou de préserver les caractéristiques originales ainsi que le comportement des bâtiments historiques, dans la mesure où les matériaux et les techniques modernes peuvent être plus adéquats et moins intrusifs que les matériaux et les techniques traditionnels. Par exemple, les polymères à fibre renforcée (PFR) présentent des avantages évidents à cet égard : ils utilisent une petite quantité de

Giambattista De TOMMASI

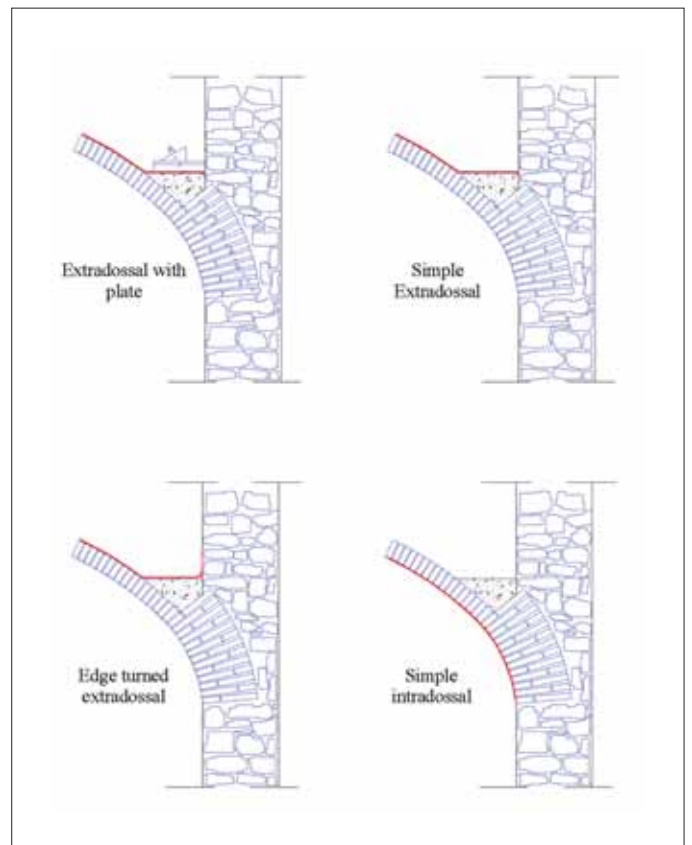
Ingénieur

Professeur titulaire au Département de Réhabilitation des Bâtiments (Polytechnique de Bari), Italie

Collaborateurs : groupe de travail de recherche (Fabio Fatiguso, Mariella De Fino et Albina Sciotti)



Application de polymères de fibre renforcée (PFR) : limitation des éléments comprimés



Renforcements de voûtes à l'aide de PFR

matériau, en termes d'épaisseur et de poids ; ils sont faciles à poser et à retirer ; ils ne modifient pas le comportement original des structures, étant donné qu'ils travaillent après le dépassement de la résistance élastique de l'élément. Toutefois, certains inconvénients doivent être soulignés et de nouvelles recherches sont nécessaires dans ce domaine afin de vérifier le comportement à long terme de ces matériaux et de ces technologies, au-delà des résultats intéressants obtenus sur le moment.

En conséquence, les thèmes développés mettent l'accent sur le fait que l'amélioration du comportement sismique de l'architecture traditionnelle historique doit représenter la synthèse optimum plutôt qu'un simple compromis entre la sécurité et la conservation. L'approche doit mettre l'accent sur la séparation des éléments trop faibles par rapport à ce qu'ils devraient être, la définition des mécanismes défaillants et le projet de conservation, qui a strictement pour but la correction des défauts structuraux. Cependant, apporter au bâtiment des caractéristiques de résistance sismique correctes, dans la plupart des cas en assurant le comportement de la « boîte », est le résultat global attendu. En ce qui concerne les techniques structurales dans la zone méditerranéenne, certains chantiers spécifiques de restauration peuvent servir d'exemples dans la mesure où ils sont capables d'assurer une bonne qualité statique d'ensemble. Pour l'essentiel, ils assurent les caractéristiques des murs ainsi que les connexions entre les murs porteurs et les autres, de même qu'avec les planchers. Ils utilisent aussi bien des solutions traditionnelles que, si cela s'avère nécessaire, des matériaux et des techniques nouveaux pour accroître les caractéristiques structurales et statiques du bâtiment ainsi que pour répondre aux conditions de sécurité imposées par la culture moderne.

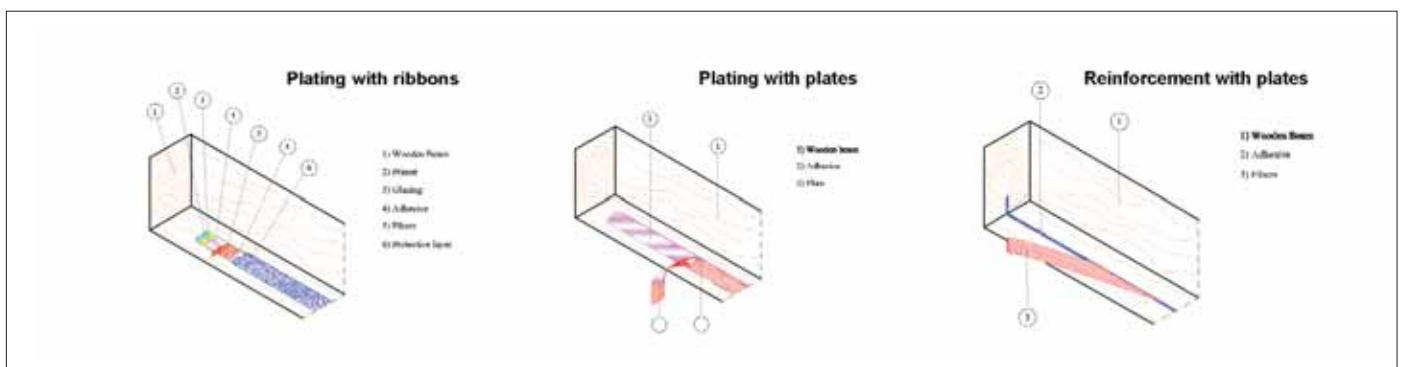
En synthèse, parmi les solutions traditionnelles, on rencontre :

- ▶ la restauration de la continuité de la texture du mur, par des réparations localisées et/ou des techniques de type « découder-coudre » ;

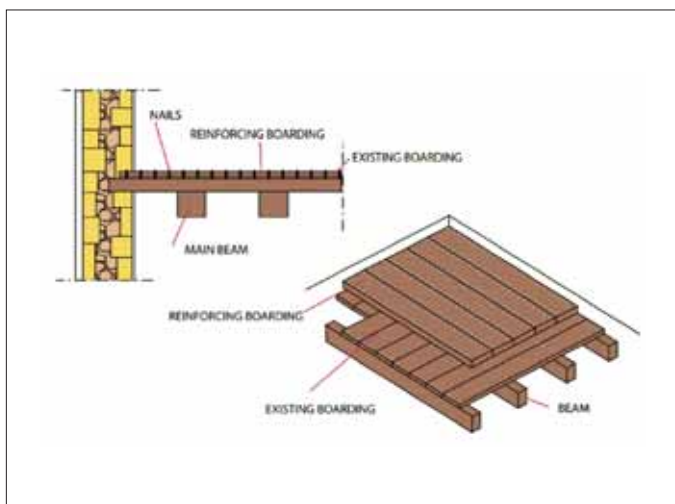
- ▶ l'amélioration de la résistance des panneaux de maçonnerie aux contraintes horizontales par la régénération des cavités avec des mélanges liants compatibles et efficaces ;
- ▶ l'élimination/réduction des faiblesses de la maçonnerie locale. La fermeture complète des conduits de cheminée et des niches dans ce but est permise dans la mesure où c'est strictement nécessaire et où cela ne modifie pas les caractéristiques formelles et structurales du bâtiment ;
- ▶ l'amélioration de la résistance sismique des renflements verticaux, des corniches ainsi que des autres éléments secondaires par la pose de tirants et d'ancrages de métal ou de matériau composite ;
- ▶ le renforcement des planchers de bois par le recouvrement par un nouveau plancher et l'application de connexions d'acier croisées et transversales.

Parmi les technologies innovatrices, on rencontre :

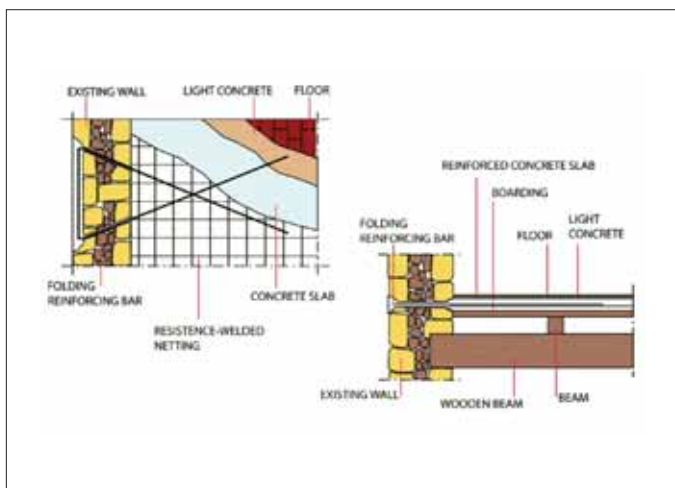
- ▶ l'amélioration des connexions entre les éléments verticaux et les planchers par des ancrages à l'aide de crampons métalliques ou de barres d'acier entre les poutres individuelles et les murs ;
- ▶ l'élimination/réduction de la déviation des arcs par des chaînes de métal ou de fibre de carbone renforcée ;
- ▶ la connexion de la partie supérieure par du béton armé, ou par des bandeaux de maçonnerie armée, ou encore par des chaînages de fibre de carbone renforcée afin de réduire la possible déviation du toit, de distribuer les contraintes horizontales induites et de joindre les murs ;
- ▶ l'amélioration des connexions entre les murs par des chaînes de métal et des perforations renforcées locales ;
- ▶ la réduction des charges de structure, tout spécialement dans la partie supérieure des étages, par le remplacement d'éléments lourds et rigides (par exemple, les toits en béton armé réalisés à la place des toits d'origine en bois).



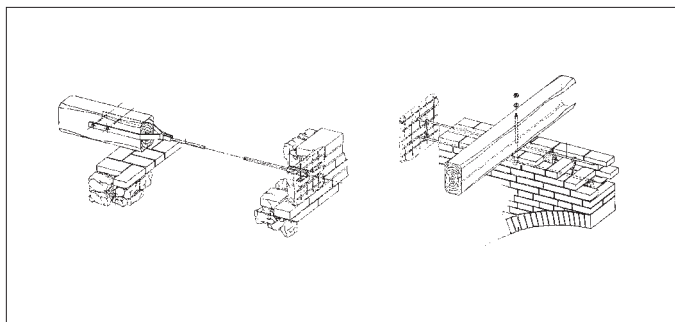
Renforcement de PFR pour des poutres de bois afin d'augmenter leur capacité porteuse



Amélioration de la capacité porteuse d'un plancher de bois (en utilisant des éléments de renfort)



Amélioration de la capacité porteuse d'un plancher de bois (en utilisant une plaque de béton armée connectée au mur)



Amélioration des connexions entre les éléments verticaux et les planchers par des ancrages de tirants métalliques

Par contre, toutes les solutions qui modifient le comportement statique du bâtiment ou ses valeurs ou encore la distribution des charges doivent être évitées. Tout particulièrement, l'augmentation des charges permanentes (par des planchers ou des toits trop lourds et trop rigides pour les murs se trouvant en-dessous), le déplacement de séparateurs de renforcement de cavités pour loger des ascenseurs ou des cages d'escalier, la pose de nouveaux planchers après la démolition partielle ou encore l'ouverture de brèches, l'affaiblissement de maçonneries, doivent tous être considérés comme étant très dangereux.

En vérité, des travaux de ce type ont été largement effectués encore tout récemment, souvent sans le moindre contrôle ou bien par des opérateurs n'étant pas au courant des caractéristiques distinctes des structures. En conséquence, des risques tout à fait dramatiques ont été introduits, tout particulièrement dans le cas des reconstructions après des tremblements de terre. La transformation ou même la démolition de ces travaux seraient nécessaires dans le cadre d'une restauration moderne et consciente, et cela entraînerait sans le moindre doute des avantages techniques qui compenseraient largement les coûts.

Références

- Abrams, D. P. (1992), « Strength and behaviour of unreinforced masonry elements », *Proceedings of the tenth World Conference on earthquake engineering*, A. A. Balkema, vol. VI : 3475-3480.
- Batoli G., Blasi C. (1997), « Masonry structures, historical buildings and monuments », chapitre 11 de *Computer analysis and design of earthquake resistant structures – A handbook* (Advances in earthquake engineering, vol. 3), édité par D. E. Beskos & S. A. Anagnostopoulos, Computational Mechanics Publications, p. 563-606.
- Carocci C. (2001), « Guidelines for the safety and preservation of historical centres in seismic area », *III International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, Université de Minho, Guimarães (Portugal), du 7 au 9 novembre 2001, p. 145-165.
- De Tommasi G., Monaco P., Vitone C., (2003), « A first approach to the load path method on masonry structure behaviour », in Brebbia, C. A. (Eds.), *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture VIII*, Wessex Institute of Technology, WIT Press, Southampton (Royaume-Uni), ISBN : 1.85312.968.2.
- Giuffrè A., Carocci C. (1996), « Vulnerability and mitigation in historical centres in seismic areas. Criteria for the formulation of a Practice Code », *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Elsevier Science Ltd.
- Giuffrè A., Carocci C. (1997), *Codice di pratica: per la conservazione dei Sassi di Matera*, Matera, La Baitta.
- Giuffrè A., Carocci C. (1999), *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo - Laterza*, Bari (Italie).
- Karaesmen, E., Unay, A. I., ErKay, C., Boyaci, N. (1992), « Seismic behaviour of old masonry structures », *Proceedings of the tenth World Conference on earthquake engineering*, A. A. Balkema, vol. VIII : 4531-4536.
- Shrive N. G., Sayed-Ahmed E. Y., Tileman D. (1997), « Creep analysis of clay masonry assemblages », *Canadian Journal of Civil Engineering*, n° 24, p. 367-379.

Renforcement des structures traditionnelles algériennes au séisme

Abdelaziz BADJADJA

Architecte

Professeur d'architecture à l'Université de Constantine, Algérie

Les éléments principaux devant résister lors d'un séisme, sont les contreventements et les planchers solidaires aux murs porteurs, en fait l'unité structurelle de la construction doit être assurée par le bâtiment en tant qu'entité.

Les charges agissant sur les éléments de structure sont : Les charges permanentes, les surcharges, les charges climatiques, et les charges sismiques.

La réaction à ces sollicitations doit être de résister à la rupture et de ne pas se déformer.

Les éléments structurants résistants au séisme et ainsi aux efforts de cisaillements de sens horizontal sont :

- ▶ Les murs porteurs de maçonnerie.
- ▶ Les colonnes en pierre brique ou en marbre
- ▶ Les arcs et voûtes.

Le choix utilisé dans la construction de type traditionnel est déjà avantageux car basé principalement sur le patio et la symétrie ; créant ainsi l'excentrement entre le centre de gravité et le point d'application de l'effort sismique ou centre de torsion.

Ce qui est prévu en règle générale dans la conception originale des constructions traditionnelles, ce ne sont que deux niveaux de masse sur le sol (le rez de chaussée et l'étage), ainsi lorsque pour diverses raisons économique et sociales, des extensions sont entreprises, augmentant les masses et par conséquent les charges vers le bas, particulièrement sur le rez de chaussée, la qualité des fondations et celles des matériaux des murs porteurs ne sont pas prévues pour assurer une résistance à de telles charges.

On rencontre souvent des écrasements et des éventrements de mur porteurs engendrant des affaissements sous l'action horizontale du séisme.

Les structures traditionnelles en Algérie se composent d'éléments verticaux que sont les murs porteurs de plus de 45cm d'épaisseur, qui sont généralement mixtes (2 à 3 rangées de briques pleines et une rangée de pierres sèches ou moellons), les colonnes en pierre, en briques ou en marbres ainsi que les murs de refends servant de contreventement ; et des éléments horizontaux servant de chaînage tels que les troncs d'arbres de tuya de diverses dimensions variant de 2 à 3 mètre 50 de longueur et enfin les éléments résistants, les jambes de forces en bois dans les deux directions reliant les arcs en briques pleines, formant un ensemble « structurel » solidaire.

Depuis les premiers séismes du 20^{ème} siècle un certain nombre de techniques ont été appliquées se résumant principalement à un



chaînage, solidarisant planchers et murs porteurs avec des tirants en acier réglable, technique très efficace mais peu utilisée à l'heure actuelle.

Ce procédé a été généralisé dans toutes les constructions et édifices publics à l'époque coloniale.

Lors du séisme d'El Asnam (dénommée Chlef aujourd'hui) l'on s'est rendu compte de la nécessité de reprendre les joints des murs porteurs en injectant du lait de ciment et de d'utiliser un enduit à base de chaux et sur un grillage de solins, et de chemiser les maçonneries d'angles quand les croisements ne sont pas fait suivant les règles de la construction.

Lors des dernier travaux de consolidation des structures pour tous les ouvrages en restauration, on a opté, dans la plupart des cas, pour la conservation de la structure traditionnelle avec ses éléments en bois et on a rajouté une seconde rangée en profilé métallique afin de solidariser le tout et créant ainsi un nouveau plancher en béton mousse plus léger et surtout résistant aux efforts horizontaux.

Toutes les jambes de forces en bois, nécessaires à la stabilité et rigidité des arcs au niveau des patios, des galeries et des chambres en T ont été remplacés par des tubes en acier rond et recouvert (habillé) en bois.

La difficulté première est de trouver des maçons et autres artisans maîtrisant encore toute les techniques de maintien en équilibre de la construction et l'intervention de façon chirurgicale sur le bâti ancien.

8



Restaurer les constructions traditionnelles en bois : l'expérience de Turquie

Banu Çelebioğlu
Architecte
Enseignante à la Faculté d'Architecture
de l'Université de Yıldız/Istanbul, Turquie

Les bâtiments en bois et maçonnerie constituent l'architecture vernaculaire en Turquie. L'utilisation préférentielle de matériaux tels le bois, la pierre ou l'adobe, pour les maisons de différentes régions, dépend de la disponibilité des matériaux et du climat. Comme le bois est léger, facile, rapide à construire et surtout résistant contre les forces horizontales, il est le matériau le plus utilisé dans la maison turque traditionnelle.

Ces maisons sont construites sur le même principe : Les constructions traditionnelles en bois de deux ou trois étages, sont généralement formées par un pan de bois construisant la structure sur un mur de sous-sol en pierre ou sur un rez-de-chaussée en maçonnerie. Entre les pièces de bois, les vides sont remplis par des hourdis de brique, de la pierre, du bois ou du pisé. L'ensemble était parfois enduit de chaux et plâtre ou revêtu par les planches de bois afin de laisser la structure respirer. (Fig. 1-2) Ce système change selon la région, le climat et le temps. En général, les planches de bois sont utilisées dans les régions humides et/ou venteuses. (Fig. 3)

Comment restaurer les structures de bois

Le Comité International du Bois de l'ICOMOS précise les principes à suivre pour la conservation des structures historiques en bois. Le message essentiel des principes est qu'il faut prendre en compte l'importance de la charpente en tant que témoin d'une technique disparue et aussi pour sa valeur culturelle. Devant une structure que l'on doit préserver, il est primordial d'en conserver tous les éléments possibles. Il ne faut jamais démonter l'ensemble d'une charpente si une grande partie peut être sauvée.

Pour la restauration des structures en bois, les méthodes traditionnelles doivent être utilisées le plus possible avec des outils originaux par des charpentiers expérimentés et une équipe pluridisciplinaire de spécialistes.

Restauration des structures en bois de la Turquie

Le patrimoine architectural des structures en bois de la Turquie a une grande importance surtout dans l'architecture civile. Malheureusement, une grande partie de ce patrimoine en bois n'a pas pu atteindre nos jours à cause de plusieurs raisons.

La restauration des structures en bois nécessite des projets, une équipe de spécialistes et le soutien financier. Les usagers de ces maisons surtout du tissu urbain et rural sont des personnes qui ont des revenus bas et qui n'ont pas la possibilité d'assurer ces conditions. Comme pour tous les pays en train de se développer,



1. Une maison en pan de bois en enduit de chaux à Afyon.



2. Une maison en pans de bois remplie par les briques en pisé à Osmaneli, Adapazarı.

il faut mettre en place des stratégies de réhabilitation pour leur restauration et les mettre en oeuvre avec le support du gouvernement, des usagers, des pouvoirs publics et des agents sociaux.

Au sujet des restaurations faites en Turquie, il y a des problèmes d'authenticité surtout pour la structure en bois et les matériaux utilisés. Lors de l'intervention sur le bois des bâtiments, il faut respecter les techniques traditionnelles et les appliquer. Si on ne reste pas fidèle à ces principes, les bâtiments perdent leur authenticité. (Fig. 4)

Les restaurations réussites existent aussi. Les deux études de cas sont choisies en sont l'exemple :

Étude de Cas 1 :

La maison en bois qu'on se nomme « Birkökler Vakfı Kona ı » se trouve à Istanbul et est classée par le Conseil des Monuments Historiques en tant que patrimoine culturel.

La maison comporte un sous-sol en maçonnerie et deux étages. Elle suit le style neo-classique et fut construite probablement au commencement du XIXème siècle par un architecte important de la région.

Après des années d'abandon, la maison est restaurée en 2005 selon les travaux de documentation et du projet. (Fig. 6) Lors du processus de restauration, suivant l'examen du pan de bois, on a décidé deux méthodes d'intervention :

- re-utiliser les pièces qui sont en bon état
- changer totalement des éléments qui ont subi des attaques par des insectes et des champignons ou purger la partie malade.

(Fig. 7)

On a traité les bois et appliqué l'imprégnation aux pièces en bois qui sont à remplacer, comme les éléments structurels, les revêtements en bois, la menuiserie, les corniches, les profils et les moulures.

Les deux cheminées sans (qui ont perdu leur) fonction, ont été valorisées en les utilisant comme des gaines pour les équipements techniques. Les équipements de protection contemporains comme les systèmes d'alarme (fuite de gaz, début d'incendie, etc.) sont installés dans les vides entre les poutres et les poteaux tout en conservant la valeur historique de la maison.

La maison a pu arriver à nos jours sans changement du plan et des façades. L'objectif était de garder ces qualités tout en remettant la maison en service.

Etude de Cas 2 :

L'autre exemple est la restauration d'une maison qui se situe dans le complexe de Yıldız palace à Istanbul. La maison se nomme « Sünnet Kökü » et comprend un sous-sol en maçonnerie et trois étages.



3. Une 'yalı' revêtue par les planches de bois au Bosphore, Istanbul.



4. Une restauration faite au Bosphore sans inquiétude d'authenticité.



5. Une restauration 'réussite' au Bosphore.



6. La consolidation temporaire des pans de bois de 'Birkökler Vakfı Konağı' (l'archive de Can Binan)



9. La consolidation des pans de bois par les nouvelles pièces de 'Sünnet Köşkü' (l'archive de Can Binan)



7. La consolidation des assemblages par des fers boulonnés à 'Birkökler Vakfı Konağı' (l'archive de Can Binan)



8. La consolidation de la structure de 'Sünnet Köşkü' (l'archive de Can Binan)

Les travaux de restauration datent de 2002. (Fig. 8) Après la documentation de la structure et de ses éléments, il a fallu démonter soigneusement les matériaux détériorés. Afin de garantir le réemploi des éléments à leur emplacement d'origine, chaque pièce de la maison fut affectée d'un numéro d'ordre.

Les désordres présents dans les charpentes étaient le pourrissement du matériau, une attaque du bois par la pourriture et les insectes. Pour les pièces à remplacer en raison d'une pourriture partielle, on a purgé le bois des parties pourries et on a consolidé les assemblages par des fers boulonnés. (Fig. 9)

Tous les matériaux, y compris les pièces de la structure, planchers, murs, plafonds, éléments de toiture, portes et fenêtres, moulures, etc. ont été conservés avec un minimum d'intervention.

Günay, R., *Türk Ev Geleneği ve Safranbolu Evleri*, İstanbul, 1998.

Froidevaux, YM., *Techniques de l'Architecture Ancienne*, Belgium.

Akın, N., Kahya, Y., 'Birkökler Vakfı Konağı', *Ahşap Dünyası*, no.22, 2005.