

## PRÉFACE

---

Voici l'ouvrage tant attendu sur la vulnérabilité du patrimoine historique et surtout sur les moyens de renforcer les bâtiments endommagés.

Rappelons que la construction parasismique est d'abord l'art de construire de telle sorte que des biens, même sérieusement fragilisés, ne s'effondrent pas ; car l'objectif premier est de sauvegarder les vies humaines, tout en préservant les monuments historiques, mémoire de l'humanité...

Tout au long de ces treize chapitres, l'auteur détaille le risque sismique, l'histoire passionnante et toujours édifiante de tout bâtiment historique, ainsi que les conséquences d'un tremblement de terre. Il donne des indications sur la stratégie de réhabilitation la plus appropriée à partir d'indicateurs de simple bon sens.

La dynamique de l'endommagement, voire de l'effondrement, essentielle pour agir et reconstruire selon les règles d'une bonne construction parasismique, y est particulièrement bien expliquée et illustrée. Une lecture attentive et fort instructive de la typologie des différents systèmes constructifs qui ont présidé à l'édification permet d'avoir une vue d'ensemble.

Ainsi, dans la conclusion du chapitre 3 sur les aqueducs du monde romain, l'auteur pose la bonne question : conforter oui... mais pour qui et pour quoi faire ? Cette interrogation peut être étendue à tous les cas étudiés et, bien au-delà, à la réhabilitation de tout bâtiment construit en zone sismique.

S'il n'est pas dans l'esprit du livre de refaire l'histoire, il s'en dégage néanmoins les atouts et les faiblesses des procédés de construction porteurs d'une architecture reconnue. Fort au plan local, le message de cet ouvrage n'en a pas moins des résonances internationales.

Au chapitre 4, l'auteur nous interpelle : « Et si vous aviez eu à concevoir cet ouvrage ? » Il interroge l'intuition que chacun a du comportement de toute construction sous l'action d'un séisme, intuition qui seule permet de dépasser une première impression devant un monument correctement entretenu.

Au-delà des études de cas, ce livre met en évidence la nécessité de penser en termes de « développement durable » pour tenir compte du devoir de mémoire et de la pérennisation des bâtiments historiques. Que faire pour éviter l'endommagement du patrimoine ? Une seule réponse peut être entendue : faire de la *prévention* sans attendre un dommage visible. Or, toutes les études de cas ici présentées montrent la quasi-inexistence de travaux de prévention.

L'ouvrage atteint donc son objectif. Il s'agit bien d'identifier la démarche spécifique qui contribue à sauver les sites historiques endommagés, à conserver la mémoire des lieux, analyser la façon dont les autorités ont géré la situation après un tremblement de terre, apprécier les dispositions prises pour leur sauvegarde immédiate (et notamment la façon dont les monuments ont été sécurisés); et de pouvoir s'en inspirer utilement pour enrichir la démarche de préservation dans un contexte qui ultérieurement présentera des analogies.

L'auteur passe en revue différents cas de confortements possibles. Il détaille les étapes adaptées à chaque type d'ouvrage.

Son propos est sans ambiguïté: il faut éviter aux biens que l'histoire nous a légués « pour les siècles des siècles » de s'effondrer lors d'un prochain séisme, dont l'occurrence est historiquement inéluctable à l'échelle du temps de conservation de ce patrimoine.

L'approche progressive des connaissances illustrée dans douze études de cas, le caractère actuel des conséquences du récent tremblement de terre au Népal, la nature pratique des exemples traités font de ce livre un outil remarquable pour tous ceux qui, étudiants, architectes ou ingénieurs, veulent acquérir une réelle formation dans le domaine de la sauvegarde des ouvrages hérités de l'histoire.

L'activité à la fois professionnelle et pédagogique d'Alain Billard l'a souvent confronté à la question que pose la sauvegarde du patrimoine. Nous devons le remercier d'avoir mis à notre disposition son expérience d'une richesse et d'une originalité sans égales.

*Victor Davidovici*

Président d'honneur de l'Association  
française de génie parasismique

## INTRODUCTION

---

# Quelques études pour comprendre

Les études qui suivent ont toutes été motivées par notre volonté de comprendre comment se sont comportés les édifices sous les charges sismiques de la région où ils sont implantés depuis qu'ils ont été érigés. Il s'agissait aussi de comprendre comment ont été appréhendées les mesures conservatoires et les actions de restauration dont ils ont été l'objet. Ce faisant, nous avons cherché quelle fut la logique de conception visant à assurer la pérennité de ces ouvrages, qu'il s'agisse des ponts-canaux sur les aqueducs de l'époque romaine ou du minaret de Jâm en Afghanistan, sachant que d'autres ont quasi totalement disparu comme le pont sur le Nahr Ibrahim (fleuve d'Abraham) au nord de Beyrouth. De ces investigations, nous avons déduit des mesures de confortement et de réhabilitation susceptibles, par exemple, de protéger les visiteurs des risques d'un tremblement de terre sur le théâtre de Xanthos ou de donner une deuxième vie à certains immeubles récents en les confortant. Enfin, et dans un sens plus large, nous avons voulu conserver le patrimoine porteur de l'histoire d'une civilisation à une période donnée, aussi bien la cathédrale péruvienne d'Ica que la tour Saint-Michel à Bordeaux.

La question restera posée de savoir s'il existe une culture parasismique dans l'organisation des villes et des villages, qu'il s'agisse du bâti ou des vides que sont les rues et les places, comme il en existe une en gestion des eaux pour se protéger des inondations en sites de montagne, des vagues destructrices des tsunamis (ou encore pour exploiter au mieux l'irrigation vivrière ou les réserves d'eau potable comme à Venise). Cette dernière interrogation survolera la ville de Lorca et certains villages pyrénéens.

Ces exemples, dont les constructions se sont étagées du VIII<sup>e</sup> siècle avant notre ère jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle, ne sauraient dresser un panorama exhaustif, mais ils témoignent de l'application d'une méthode permettant parfois d'aboutir à des propositions de confortement. Ils ont été choisis au gré des opportunités et, pour certains, grâce au travail remarquable de jeunes architectes, soucieux de spécialisation, qui se sont investis dans l'aventure de la déduction technique faisant architecture.

Comprendre un édifice passe par une enquête où chaque observation amène une question à laquelle ne répond souvent qu'une autre question, un cheminement méthodique qui permet des hypothèses; celles-ci ouvrent aussi la voie vers des conclusions ou mieux encore *sur* une conclusion, à la lumière des savoirs et des savoir-faire d'une époque.

Proposer un confortement se lit sous plusieurs regards. Le principal est celui de l'architecture : elle témoigne de l'histoire inventive d'un peuple au travers des héritages qu'elle a voulu transmettre. Tout le reste, ce sont les moyens, des moyens sans lesquels toute investigation ne saurait être conclue ou plus simplement être crédible. Il s'agit d'abord de la connaissance des techniques constructives adoptées à un moment donné avec les matériaux et les outils disponibles, non pas (et surtout pas) pour en perpétuer la mise en œuvre par mimétisme mais pour assurer la pérennité des ouvrages (la reconstruction des voûtes d'Assise en est un exemple). Support de la conception, le calcul ne se situe pas dans un registre complexe, mais se fait avec des formulations simples : celles qu'avaient adoptées les constructeurs de l'époque, revues à l'aune des connaissances actuelles et des performances des matériaux contemporains et de leur mise en œuvre ; il en est ainsi du choix des fibres de carbone ou de titane plutôt que du mortier de chaux. Enfin, le confortement fait partie de la vie d'un édifice et les générations à venir auront à le discerner et non à le découvrir par hasard ou par déduction (ce qui exclut la dissimulation pratiquée par certains architectes chargés des travaux de restauration et de consolidation de certains monuments de la Grande-Bretagne).

Le choix des différents édifices et sites retenus ici est essentiellement dicté par les opportunités qui se sont présentées à l'auteur au fil du temps et des voyages ; les observations ont pu être faites dans le cadre des activités d'associations scientifiques, de collectivités territoriales, de responsables de sites archéologiques, de laboratoires spécialisés ou d'universités dont les préoccupations, souvent bien éloignées du sujet, ont cependant ouvert les portes d'un domaine aussi spécifique. Les exemples ont été réinstallés dans le temps, ce qui a permis de les comprendre au regard de l'évolution et des interactions des savoirs et des savoir-faire de leurs époques et de leurs régions.

## À propos de la méthode

Un bâtiment est une console fichée dans un sol porteur. Comment a-t-elle été conçue ? Comment peut-on mécaniquement la comprendre dans sa structure et dans son environnement ? Et maintenant, si son projet nous était confié avec les savoirs de son époque ? Si son confortement nous était confié avec les savoirs de notre époque ?

Un bâtiment soumis aux vibrations des sols et qui a traversé les siècles détient un secret : il réagit de façon homogène aux sollicitations, comme un tout et non comme une accumulation d'éléments. Il a été voulu pérenne par-delà sa fonction d'usage et son dessin à la mode du moment.

La ligne directrice de la recherche est alors toute tracée. Comment cet ouvrage a-t-il été conçu pour réagir de façon harmonieuse et appropriée aux charges dynamiques des vents et des sols ? Comment prolonger sa réactivité usée par le temps, usée par les hommes et la réinstaller pour longtemps dans une fonction qui n'est plus celle qui lui a donné naissance ?

Deux préoccupations intimement dépendantes vont asseoir cette démarche tant au niveau de la compréhension que du confortement, voire de la reconstitution quand elle sera possible : *l'une est de retrouver à l'édifice le comportement oscillatoire d'une parabole ; l'autre est de*

*rapprocher la réaction des maçonneries, des bois ou des bétons de faible performance, de celle d'un système isotrope<sup>1</sup>.*

Enfin, tous les exemples traités sont limités aux conclusions d'un avant-projet, celui qui ouvre la porte aux décisions à prendre pour le maître d'ouvrage ainsi qu'à l'approfondissement technique et architectural de telle ou telle solution retenue. Ainsi, chaque exemple sera développé en trois étapes : 1) le diagnostic mécanique du comportement dans le domaine statique ; 2) le comportement sous charges dynamiques ; 3) des propositions de confortement ou de reconstitution.

Rappelons qu'une liste des éléments d'informations utiles est énoncée en introduction du chapitre 3 de *Risque sismique et patrimoine bâti – Comment réduire la vulnérabilité: savoirs et savoir-faire*, Afnor et Eyrolles, 2014 ; ces éléments ne sont pas énoncés dans un ordre strictement hiérarchisé puisque, dans chacune des étapes, telle définition sera plus utile qu'une autre pour comprendre les suivantes. De plus, tous les éléments ne sont pas indispensables pour amener à la dernière des trois étapes. On comprendra aisément ce qu'il est nécessaire de savoir pour conforter une grange pyrénéenne du XIX<sup>e</sup> siècle sur un flanc de montagne ou, dans la même région, une abbaye du XIV<sup>e</sup> siècle en centre-ville.

## Étape n° 1 : Diagnostic

*L'objectif est de connaître l'ouvrage sous tous ses aspects : historique, architectural, mécanique, ainsi que les conditions de son site d'insertion. Déjà à ce niveau d'investigation émergent quelques pistes porteuses des propositions de renforcement.*

- 1– Relevés de la structure cotés avec précision, ainsi que des cloisonnements divers, des escaliers, des ascenseurs et autres organes de liaison
- 2– Vérification de la stabilité dans le domaine statique
- 3– Modélisation de la structure en 3D
- 4– État de la régularité géométrique
- 5– État de la régularité mécanique
- 6– Définition des positions respectives des plans barycentriques des masses (G) et des torsions (T) sur l'ensemble de l'édifice, évaluation de l'excentricité  $e$
- 7– En cas d'irrégularité géométrique, ou mécanique, de non-superposition des barycentres G, T ou de non-continuité horizontale ou verticale de leurs différents plans, propositions justifiées de découpes de l'édifice en bâtiments autonomes

---

1. *Avertissement* : Les calculs menés par les scientifiques découpent les réactions des bâtiments existants en strates, ce qui donne des résultats précis et nécessaires pour un projet d'exécution. Notre démarche est différente parce qu'elle est celle d'un avant-projet. Elle vise d'une part à rapprocher le comportement de matériaux hétérogènes, notamment en maçonnerie, d'un système où ils deviendraient plus isotropes, ce qui est l'une des deux préoccupations énoncées précédemment à propos de la méthode. D'autre part, le choix d'une recherche de déformation globale selon un système oscillatoire en parabole est l'autre élément de la méthode. Il est *a priori* puisqu'un bâtiment peut prendre une géométrie oscillatoire tout autre, comme celle d'une sinusoïde à plusieurs noeuds par exemple ; toutefois, les bâtiments étudiés sont peu élevés et la parabole est une déformée à laquelle ils peuvent se soumettre.

- 8– Définition de la période propre du bâtiment ou des périodes propres ( $T_b$ ) de chaque bâtiment après découpes
- 9– Établissement de la période du sol ( $T_s$ )
- 10– Comparaison des périodes de chaque bâtiment avec celle du sol
- 11– Détermination mécanique éventuelle des joints de rupture entre chaque bâtiment
- 12– Propositions architecturales et techniques pour réaliser les joints de rupture
- 13– Nouvelle modélisation des coupes de la structure avec cotes d'axes
- 14– Nouvelle modélisation de la structure en 3D
- 15– **Conclusion sur l'étape n° 1 : Première série vers des propositions de renforcement**
  - À propos de la mise en régularité géométrique et mécanique si besoin
  - À propos des plans barycentriques des masses et des torsions
  - À propos de la comparaison des périodes de chaque bâtiment ou de l'édifice s'il n'est qu'un bâtiment, avec la période du sol
  - À propos des joints de rupture

## Étape n°2 : Comportement de l'édifice sous charges dynamiques

*La démarche consiste à comparer les raideurs actuelles à celles qui seraient mieux appropriées aux charges dynamiques potentielles, ce qui précise et complète la direction des premières propositions de renforcement précédemment évoquées.*

- 16– Déformations de la structure en l'état actuel
  - Déformations du modèle en 3D établi en point 3, dans la direction des charges sismiques
  - Déformation du modèle en 3D établi en point 3, dans les autres directions lorsqu'est modélisée la déformation selon la direction des charges
- 17– Déformations de la structure après les premières propositions de renforcement (cf. point 15)
  - Déformations des coupes modélisées établies en point 13, dans la direction des charges sismiques
  - Déformation du modèle en 3D établi en point 14, dans les autres directions lorsqu'est modélisée la déformation selon la direction des charges
- 18– Calcul de la rigidité globale que devrait avoir l'édifice en l'état actuel s'il n'est qu'un seul bâtiment, ou de chaque corps de bâtiment une fois isolé des autres par des joints de rupture
- 19– Calcul des raideurs de chaque porteur en l'état actuel
- 20– Calcul de la rigidité globale que devrait avoir l'édifice s'il n'est qu'un seul bâtiment ou que devrait avoir chaque bâtiment après découpe, dans la direction des charges
- 21– Calcul de la rigidité globale que devrait avoir l'édifice s'il n'est qu'un seul bâtiment ou que devrait avoir chaque bâtiment après découpe, dans les autres directions

- 22– Répartition de la raideur que devrait avoir chaque porteur après le calcul de la rigidité globale de l'édifice s'il n'est qu'un seul bâtiment ou de chaque bâtiment après découpes (*cf.* point 21)
- 23– Comparaison des raideurs souhaitées pour chaque porteur (*cf.* point 22) avec celles établies en l'état actuel (*cf.* point 19)
- 24– Calcul des raideurs de chaque plancher après découpes de l'édifice en bâtiments séparés par les joints de rupture (*cf.* point 7)
- 25– **Conclusion sur l'étape n° 2 : Deuxième série vers des propositions de confortement**  
Niveaux de raideurs souhaités pour les porteurs, les planchers et les charpentes (toits plats) et types de liaisons aux porteurs
  - Reprendre les calculs comparatifs des raideurs des porteurs et l'état actuel et en l'état souhaité (*cf.* point 23) et en déduire le système mécanique qu'il y aurait lieu d'adopter : poteaux courts, poteaux longs?
  - Établir les niveaux de rigidité souhaités pour les planchers et les charpentes (ou toits plats) et en déduire les liaisons aux porteurs (articulées, encastées)
  - Modéliser les déformations de la structure en 3D à partir des hypothèses énoncées précédemment pour les porteurs, pour les planchers et pour les charpentes (ou toits plats) et comparer avec les résultats obtenus en point 17

### Étape n° 3 : Propositions de renforcement ou de reconstitution

*Sont hiérarchisées les interventions possibles et leur faisabilité. Cette démarche est suivie d'un choix de solutions techniques et architecturales commentées de leurs niveaux de fiabilité.*

- 26– À partir des résultats obtenus aux points 7, 15 et 25, indiquer sur les coupes quels sont les planchers utiles à la stabilité de l'édifice et ceux qui ne le sont pas (planchers morts)
- 27– Propositions de confortements techniques des planchers utiles et morts, et des charpentes (toits plats) pour obtenir leurs raideurs souhaitées et propositions d'interventions sur leurs liaisons aux porteurs
- 28– Propositions de confortement technique et architectural des porteurs pour obtenir leurs raideurs respectives souhaitées
- 29– Vérification du rôle des escaliers et propositions de réajustement technique
- 30– Vérification des contreventements dans les trois différentes directions et éventuellement recherche d'une mise en triangulation du volume global ou de chaque bâtiment après découpe
- 31– Vérification de la compatibilité de l'excentricité ( $e$ ) avec le fonctionnement général de la structure
- 32– **Conclusion sur l'étape n° 3 : Hiérarchisation et limites des interventions**
  - Du point de vue technique
  - Du point de vue architectural et législatif
  - Du point de vue financier.