

**Le facteur séisme dans l'architecture vernaculaire.
Un décryptage entre déterminants culturels, types de
structures et ressources cognitives parasismiques**

THÈSE N° 6578 (2015)

PRÉSENTÉE LE 13 MAI 2015

À LA FACULTÉ DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
ARCHIVES DE LA CONSTRUCTION MODERNE
PROGRAMME DOCTORAL EN ARCHITECTURE ET SCIENCES DE LA VILLE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Milo HOFMANN

acceptée sur proposition du jury:

Prof. L. Orтели, président du jury
Prof. P. Frey, Prof. H. Guillaud, directeurs de thèse
Prof. M. Devaux Baudraz, rapporteuse
Prof. A. Muttoni, rapporteur
Prof. U. Tonietti, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2015



REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont au Prof. Pierre Frey (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse), directeur de thèse, qui m'a donné la possibilité d'entreprendre cette recherche en doctorat et de participer à l'enseignement dispensé par son laboratoire ; son esprit critique, ses conseils et ses propos, ont joué un rôle important tout au long de ces quatre années.

Je remercie le Prof. Hubert Guillaud (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, France), co-directeur de thèse, pour ses commentaires attentifs, remarques constructives et paroles toujours très encourageantes.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury de thèse : Prof. Mylène Devaux Baudraz (Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg, Suisse), Prof. Aurelio Muttoni (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse), Prof. Luca Ortelli (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse), Prof. Ugo Tonietti (Université des Etudes de Florence, Italie) ; je les remercie pour leur disponibilité, pour le temps consacré à la lecture et à l'évaluation de ce document, ainsi que pour leurs apports.

Je tiens à remercier également Tom Schacher (architecte consultant pour la Direction du développement et de la coopération, Suisse), ayant contribué de manière substantielle aux réflexions entamées dans le cadre de cette recherche. Pour cette même raison, un grand merci aussi à l'ensemble des personnes avec lesquelles j'ai eu des entretiens particulièrement enrichissants : Mme Marina Marinov (architecte consultante pour la Direction du développement et de la coopération, Suisse), Christophe Valentini (Office cantonal de la protection des biens culturels, canton du Valais, Suisse), Prof. Ferruccio Ferrigni (Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels de Ravello, Italie), Dr. Antonello Ciccozzi (Université des Etudes de L'Aquila, Italie), M. Gianfranco D'Alò (Soprintendenza pour les Biens Architecturaux et Paysagistiques des Abruzzes, Italie), M. Olivier Moles (Centre International de la Construction en Terre CRAterre, France), M. Volkan Şenel (Municipalité Métropolitaine de Kocaeli, Turquie), Dr. Melania Sherdenkovska (Université Saints-Cyrille-et-Méthode de Skopje, Macédoine), arch. Randolph Langenbach (Etats-Unis).

Merci aussi à l'équipe des Archives de la construction moderne, Jean-Daniel Chavan, Joëlle Neuenschwander Feihl, Antoine Baudin, Angelica Bersano, Sabrina Martone, Caroline Etter, Sytse de Maat et Maryam Jafarbegloo, pour leur écoute et leur soutien.

Grazie a : Luzi e Gianni, di tutto ; Annalisa, per il tuo costante aiuto, le tue letture e riletture, ma soprattutto per la tua compagnia, essenziale ; Stefano Z., Chiara, Matteo, Zérane, Davide R., Céline, Raphael, Patricia, Jimmy, Olivia, Martino, Plinio, Nicola, Stefano D., Luca, Davide C., Elias, Didier et Jan, per la vostra amicizia.

RÉSUMÉ

Dans de nombreuses zones sismiques, une partie du bâti ancien a été édifée exclusivement grâce à l'expérience des bâtisseurs qui se sont succédés le long des siècles. Certains des procédés constructifs qu'ils ont élaborés ont démontré une bonne performance lors de tremblements de terre, témoignant parfois de véritables cultures du risque. De nos jours, le phénomène sismique n'est toutefois pas systématiquement considéré comme un facteur qui pouvait avoir été pris en compte par les bâtisseurs du passé. Une méconnaissance au regard des cultures constructives vernaculaires et de leur corrélation avec le phénomène sismique augmente la probabilité que les interventions sur le bâti ancien et les activités de prévention ne bénéficient guère des potentialités intrinsèques à chaque milieu, risquant même d'en déterminer une vulnérabilité accrue.

L'investigation de cette problématique s'est fondée sur l'hypothèse de travail suivante : décrypter le lien entre l'architecture vernaculaire et le *facteur séisme* depuis des perspectives centrées sur les aspects culturels, structurels et cognitifs, contribuerait à réduire la vulnérabilité des populations et des environnements bâtis anciens, grâce à une compréhension approfondie et à une connaissance fine des principes qui régissent leur résilience. Cette recherche a visé à mettre en exergue les questionnements et les argumentaires favorisant la reconnaissance de l'ingéniosité inhérente aux cultures constructives du passé et stimulant leur valorisation dans la pratique actuelle.

Les facteurs de corrélation entre l'environnement bâti vernaculaire et les phénomènes sismiques ont été étudiés au travers de l'exploration de trois axes de recherche. Le premier considère les déterminants culturels, soit les aspects qui exercent une influence marquée sur les réactions des sociétés aux séismes. Le deuxième s'intéresse aux types de structures vernaculaires qualifiables comme parasismiques. Le troisième porte sur les ressources cognitives, en approfondissant le savoir relatif à l'efficacité d'une pratique répandue dans plusieurs régions sismiques, consistant à intégrer des éléments horizontaux en bois dans les murs en maçonnerie.

L'exploration de ces axes de recherche s'est basée sur une revue de la littérature ainsi que sur des analyses de terrain, au cours desquelles l'environnement bâti vernaculaire a été considéré depuis plusieurs perspectives. Il a été perçu comme un milieu imprégné de stratégies de résilience se rapportant à des mesures réduisant la vulnérabilité des constructions et à des comportements précautionneux adoptés par les populations (province de L'Aquila, Italie). Parallèlement, les architectures ont été examinées en tant que témoin de solutions constructives adaptées à la sismicité historique des lieux (territoire de la faille nord anatolienne, Turquie), et comme l'expression de savoirs se référant aux effets induits par des sollicitations horizontales (région du lac d'Ohrid, Macédoine et Albanie).

Les éléments émergeant de cette recherche démontrent le potentiel présenté par une approche questionnant simultanément des aspects relatifs à l'ordre de la perception, de la technique et de la connaissance. Le décryptage du lien entre l'architecture vernaculaire et le *facteur séisme*, comme entre déterminants culturels, types de structures et ressources cognitives, se révèle de fait une source d'éléments concrets et contextuels à partir desquels concevoir des stratégies de résilience multi- et transdisciplinaires.

Mots-clés

Architecture vernaculaire, Tremblements de terre, Mémoire sismique, Culture du risque, Procédés constructifs vernaculaires, « Règles de l'art » vernaculaires parasismiques

ABSTRACT

A large part of ancient built environments in earthquake prone areas have been accomplished exclusively thanks to the experience that their builders developed over centuries of practice. Several of the resulting techniques have showed a satisfactory performance during earthquakes, attesting sometimes of risk cultures. Nowadays, the seismic phenomenon is not systematically considered as a factor that might have been taken into account by ancient builders. A lack of knowledge about vernacular building cultures and their correlation with these phenomena raises the probability that interventions on ancient built stock and prevention activities do not take advantage of site potentialities, even increasing its vulnerability.

These issues have been investigated on the basis of the following research assumption: decoding the link between vernacular architecture and earthquakes considering cultural, structural and cognitive aspects, could contribute to reduce the vulnerability of people and ancient built environments, thanks to an in-depth understanding of mechanisms and dynamics supporting their resilience. Thus, this research aimed at highlighting questions and arguments fostering the appreciation of inventiveness inherent to past building cultures and enhancing their value in contemporary practice.

Correlation factors between vernacular built environment and seismic phenomena have been explored through three research axes. The first one considers cultural determinants, namely the aspects that have a marked impact on the society reactions to earthquakes. The second one investigates types of vernacular structures that could be qualified as paraseismic. The third research axe concerns cognitive resources regarding effectiveness of a particular building practice implemented in many seismic regions, based on the integration of horizontal wood elements in masonry walls.

The exploration of these axes has been accomplished through literature review and field studies considering vernacular built environment from multiple perspectives. It has been perceived as an environment permeated by resilience strategies referred to measures reducing building vulnerability and to precautionary behaviours adopted by populations (L'Aquila Province, Italy). At the same time, buildings have been examined as testimony of structural solutions adapted to the historical seismicity of the area (territory of North Anatolian Fault, Turkey), and as the expression of knowledge closely related to horizontal forces effects (Ohrid Lake region, Macedonia & Albania).

Findings from this research highlight the potential of an approach questioning aspects referred to perception, technique and knowledge. Decoding the link between vernacular architecture and earthquakes as between cultural determinants, types of structures and cognitive resources, thus becomes a source of substantial and contextualized elements from which develop resilience strategies that are multi- and trans-disciplinary.

Keywords

Vernacular architecture, Earthquakes, Seismic memory, Risk culture, Vernacular building techniques, Paraseismic vernacular workmanlike manner

RIASSUNTO

In numerose regioni esposte al rischio sismico, gran parte degli edifici storici è stata realizzata esclusivamente sulla base dell'esperienza dei costruttori susseguiti nel corso dei secoli. Molteplici delle tecniche costruttive elaborate da quest'ultimi hanno dimostrato un buon rendimento in occasione di terremoti, testimoniando a volte di vere e proprie culture del rischio. Oggigiorno, il fenomeno sismico non è tuttavia sistematicamente considerato come un fattore suscettibile di essere stato preso in considerazione dai costruttori del passato. Le lacune conoscitive rispetto alle culture costruttive vernacolari e alla loro correlazione con il fenomeno sismico aumentano inevitabilmente la probabilità che gli interventi sul fabbricato storico e le attività di prevenzione non beneficino appieno delle potenzialità intrinseche ad ogni contesto, potendo perfino amplificare la sua vulnerabilità.

L'investigazione di questa problematica si è fondata sulla seguente ipotesi di ricerca: decodificare il legame tra l'architettura vernacolare ed il *fattore sisma* sulla base di prospettive centrate su aspetti culturali, strutturali e cognitivi, può contribuire a ridurre la vulnerabilità delle popolazioni e del costruito storico, grazie ad una comprensione approfondita e una conoscenza dettagliata dei principi che determinano la loro resilienza. L'analisi ha mirato a mettere in risalto i quesiti e le argomentazioni che favoriscono l'apprezzamento dell'ingegnosità inerente alle culture costruttive del passato e che stimolano la loro valorizzazione nella pratica contemporanea.

I fattori di correlazione tra il costruito vernacolare e i fenomeni sismici sono stati studiati attraverso l'esplorazione di tre assi di ricerca. Il primo considera i determinanti culturali, ossia gli aspetti che esercitano una marcata influenza sulle reazioni delle società ai terremoti. Il secondo s'interessa ai tipi di strutture vernacolari qualificabili come parasismici. Il terzo porta sulle risorse cognitive e, in particolar modo, sul sapere relativo all'efficacia di una pratica diffusa in molte regioni sismiche, consistente nell'integrare nelle murature degli elementi orizzontali in legno.

L'esplorazione di questi assi di ricerca si è basata sulla letteratura esistente e delle analisi di terreno, nel corso delle quali l'edificato vernacolare è stato considerato da più prospettive. È stato compreso come un ambiente impregnato di strategie di resilienza riferite a delle misure di riduzione della vulnerabilità delle costruzioni ed a comportamenti precauzionali adottati dalle popolazioni (provincia dell'Aquila, Italia). Parallelamente, gli edifici sono stati esaminati in quanto testimonianza di soluzioni costruttive adattate alla sismicità storica dei luoghi (territorio della faglia anatolica settentrionale, Turchia), e come l'espressione di saperi che si riferiscono agli effetti provocati da sollecitazioni orizzontali (regione del lago di Ohrid, Macedonia e Albania).

Gli elementi emergenti da questa ricerca mettono in evidenza il potenziale d'un approccio che interroga simultaneamente aspetti relativi alla percezione, alla tecnica e alla conoscenza. Il processo di decodificazione del legame tra l'architettura vernacolare ed il *fattore sisma*, come tra determinanti culturali, tipi di strutture e risorse cognitive, costituisce di fatto una fonte d'elementi concreti e contestuali a partire dai quali concepire delle strategie di resilienza multi- e transdisciplinari.

Parole chiave

Architettura vernacolare, Terremoti, Memoria sismica, Cultura del rischio, Tecniche costruttive vernacolari, « Regole dell'arte » vernacolari parasismiche

TABLE DES MATIÈRES

Préface	15
INTRODUCTION	17
1. Domaine de la recherche : architectures sans architectes en zone sismique	17
2. Cadre de référence	21
2.1. Acte de bâtir et risque sismique	21
2.2. Etudier les environnements bâtis vernaculaires	26
2.3. Décrypter le lien entre architecture vernaculaire et <i>facteur séisme</i> : problématiques, perspectives et questionnements	32
3. Cadre de la recherche	35
3.1. Hypothèse de travail	35
3.2. Approche méthodologique	35
3.3. Présentation du plan de thèse	42
PARTIE I : DÉTERMINANTS CULTURELS PARASISMQUES	45
Introduction de la partie I	45
Entre signes et sensibilités	47
1. Signes sismiques	47
1.1. Impacts des séismes sur le milieu humain	47
1.2. Interprétations des signes sismiques	50
2. Interdépendance entre sensibilité sismique et vulnérabilité	58
2.1. Institutions publiques et vulnérabilité du bâti	58
2.2. Culture constructive, cadre normatif et vulnérabilité du bâti	61
2.3. Amplification dans le temps de la vulnérabilité sociale	63
3. Le bâti : matérialisation d'aspects culturels corrélés au <i>facteur séisme</i>	68
Etude de cas : Résilience sismique et culture du risque Province de L'Aquila, Italie	71
4. Introduction	71
4.1. Localisation	71
4.2. Modes d'investigation sur le terrain	74
5. Eléments émergents	75
5.1. Mémoires individuelles et collectives rapportées au phénomène sismique	76
5.2. Connaissance populaire sur les particularités constructives parasismiques	82
5.3. Interprétations contemporaines des signes sismiques	92
Synthèse	99
6. Reconnaître les déterminants culturels parasismiques	99
6.1. Lisibilité de la dimension constructive des cultures du risque	100
6.2. Interaction entre représentations populaires et institutionnelles	101
6.3. Restauration mémorielle à travers l'environnement bâti	102

PARTIE II : TYPES DE STRUCTURES PARASISMIQUES	105
Introduction de la partie II	105
Entre approches et particularités	107
1. Architectures vernaculaires ayant résisté aux séismes	107
1.1. Approches constructives	107
1.2. Typologie des systèmes porteurs verticaux	111
1.3. Groupes typologiques	124
2. Caractère parasismique du bâti vernaculaire	126
2.1. Six caractéristiques parasismiques	126
2.2. Une question de fiabilité et de viabilité	133
3. Le bâti : concrétisation de choix constructifs corrélés au <i>facteur séisme</i>	136
Etude de cas : Spécificités du bâti et sismicités historiques	
Territoire de la faille nord anatolienne, Turquie	139
4. Introduction	139
4.1. Localisation	139
4.2. Modes d'investigation sur le terrain	142
5. Eléments émergents	143
5.1. Architectures en maçonnerie avec insertions horizontales en bois	144
5.2. Architectures à ossature en bois avec remplissage	152
5.3. Architectures en maçonnerie avec éléments horizontaux et verticaux en bois	160
Synthèse	165
6. Redécouvrir les types de structures parasismiques	165
6.1. Variantes constructives adaptées au niveau local de risque	166
6.2. Particularités augmentant l'efficacité du procédé constructif	167
6.3. Cultures et singularités constructives parasismiques	168
PARTIE III : RESSOURCES COGNITIVES PARASISMIQUES	171
Introduction de la partie III	171
Entre intuitions et savoirs	173
1. Inclusion d'éléments horizontaux dans les murs	173
1.1. Influence des insertions sur le comportement statique	173
1.2. Insertions et sollicitations : deux corrélations spécifiques	180
2. Insertions horizontales en bois en forme d'échelle	184
2.1. Rôles dans le comportement dynamique des maçonneries	184
2.2. Enjeux techniques et culturels dans la reconnaissance institutionnelle	192
3. Le bâti : manifestation de connaissances empiriques corrélées au <i>facteur séisme</i>	198
Etude de cas : Diversités constructives et effets sismiques	
Région du lac d'Ohrid, Macédoine et Albanie	201
4. Introduction	201
4.1. Localisation	201
4.2. Modes d'investigation sur le terrain	204
5. Eléments émergents	205
5.1. Diffusion des savoirs parmi les groupes de bâtisseurs vernaculaires	206

5.2. Dégâts sismiques dans l'environnement bâti	210
5.3. Solutions constructives parasismiques	218
Synthèse	227
6. Revitaliser les ressources cognitives parasismiques	227
6.1. Accroissement du savoir scientifique	228
6.2. Renforcement des compétences locales	229
6.3. Partage d'expériences sismiques entre sites, régions et pays	230
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	233
1. Appréciation du caractère parasismique du bâti vernaculaire, entre performance et intuition	234
1.1. S'appuyer sur des modèles constructifs de référence	234
1.2. Saisir les corrélations entre les particularités structurelles et le phénomène sismique	236
1.3. Pour une formalisation des « règles de l'art » vernaculaires parasismiques	238
2. Vers une reconnaissance des stratégies vernaculaires parasismiques, entre technologie et anthropologie	239
ANNEXES	243
BIBLIOGRAPHIE	255
LISTE DES FIGURES	269
LISTE DES TABLEAUX	273
CURRICULUM VITAE	275

PRÉFACE

La présente recherche de thèse se place dans la continuité d'un parcours académique et professionnel fondé sur un intérêt pour l'interaction entre l'acte de bâtir, compris comme le processus de création d'habitats sains, beaux et sûrs, et l'environnement naturel, entendu comme source de matières et matériaux de construction mais également comme possible facteur de destruction des ouvrages réalisés par l'Homme.

Ce parcours a débuté en 2005 avec un projet de Master présenté à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) pendant lequel je me suis intéressé à la problématique de l'habitat dans un contexte régulièrement affecté par des aléas naturels majeurs (cyclones, inondations) : les zones rurales de l'Etat de l'Orissa, en Inde, où leurs effets sur les environnements bâtis et les milieux humains sont particulièrement élevés¹. Ce travail académique a été poursuivi, en 2007, avec une étude davantage approfondie sur le bâti vernaculaire et sur le bambou en tant que matériau de construction ; cette recherche a inclus un projet pour un prototype d'habitation réalisé avec un groupe d'artisans locaux².

Une prise de conscience accrue des potentialités architecturales des matériaux naturels ainsi que face aux bénéfices que leur utilisation peut avoir sur les dynamiques locales m'a encouragé à approfondir les connaissances d'une matière ancestrale utilisée à l'échelle de la planète : la terre crue. Ainsi, entre 2008 et 2010, j'ai suivi une formation consacrée à ce matériau ainsi qu'à des démarches de projet relatives à la conservation du patrimoine bâti et à la reconstruction d'habitat suite à l'impact d'aléas naturels, en Europe comme ailleurs³. Au cours de cette période, la volonté de mieux saisir les réponses qui sont apportées aujourd'hui aux catastrophes naturelles m'a conduit à participer à un état des lieux de deux programmes de reconstruction conduits dans la province d'Aceh en Indonésie, après le séisme et le tsunami qui a eu lieu dans l'océan Indien en 2004⁴. Il en est résulté un mémoire de fin d'étude centré sur les synergies possibles entre les projets de reconstruction et les pratiques architecturales traditionnellement adoptées par les populations pour se protéger envers des aléas naturels potentiellement destructeurs⁵.

Au travers de ces expériences, de recherche et de terrain, j'ai pu me mesurer avec les enjeux, aussi bien techniques que sociaux, dans le processus d'adaptation de l'Homme à la planète Terre ; ce qui m'a encouragé à développer le présent travail de thèse.

1 Caimi, A. & Hofmann, M., 2005. *From kutcha to pucca. Proposition de reconstruction d'habitats résistant aux calamités naturelles pour les villages de l'Orissa en Inde*. Thèse de Master en architecture, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse). Travail effectué sous la direction du Prof. Martin Steinmann (EPFL).

2 Caimi, A. & Hofmann, M., 2007. *Localisme du bambou. Entre tradition et innovation : recherche sur le bambou et réalisation d'une construction économique résistante aux calamités naturelles avec la population locale (Orissa, Inde)*. Rapport de recherche, Fondation Geisendorf (Suisse). Travail suivi par le Prof. Pierre Frey (EPFL).

3 Formation post-Master dénommée « Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement DSA-Architecture de terre », dispensée par le laboratoire CRAterre, Centre International de la Construction en Terre de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (France), Chaire UNESCO « Architecture de terre, cultures constructives et développement durable ».

4 Caimi, A. & Hofmann, M., 2010. *Etat des lieux de la reconstruction post-tsunami. Deux projets d'habitations dans la province d'Aceh, en Indonésie*. Rapport de stage, Association CRAterre & Fondation Abbé Pierre (France).

5 Caimi, A. & Hofmann, M., 2010. *Aléas naturels, reconstructions et pratiques vernaculaires*. Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement « Architecture de terre » (DSA-Terre 2008-2010, mention Patrimoine). Thèse DSA, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (France). Travail effectué sous la direction de l'ingénieur Olivier Moles.

Introduction

1. DOMAINE DE LA RECHERCHE : ARCHITECTURES SANS ARCHITECTES EN ZONE SISMIQUE

Différents types d'aléas naturels⁶ participent à la vie de la planète : tremblements de terre, cyclones, inondations sont parmi les plus perceptibles des puissants phénomènes qui animent la surface et les profondeurs terrestres. Leurs effets sur l'Homme sont considérables : pendant les deux dernières décennies du XX^e siècle, ils ont affecté, d'une manière plus ou moins directe, 75 % de la population mondiale (UNDP 2004).

Nombre de ces phénomènes se produisent cycliquement dans des régions bien précises et sont déterminés par un ensemble de paramètres spécifiques d'ordre physique, géologique ou atmosphérique (Shaw et al. 2008). Leur périodicité joue un rôle ambivalent. D'une part, elle est un facteur de dérèglement des dynamiques locales, systématiquement assujetties à des événements catastrophiques à l'origine d'une « *rupture grave du fonctionnement d'une communauté ou d'une société* » (UNISDR 2009, p.11). D'autre part, leur répétition dans le temps permet de saisir les propriétés distinctives à chacun de ces aléas ; une gestion des risques peut ainsi se développer par le biais de stratégies de prévention, d'atténuation ou de préparation qui évitent leurs effets néfastes, réduisent leur ampleur et/ou renforcent les capacités nécessaires pour gérer efficacement les situations d'urgence⁷.

Le phénomène sismique constitue le processus géologique le plus meurtrier : au cours des derniers 4'000 ans, 6'000 tremblements de terre particulièrement puissants ont provoqué la mort de 11 millions de personnes (Korup 2010). Force est de constater que le nombre d'individus affectés ne semble pas diminuer au fil du temps, au contraire : au début du XX^e siècle, moins d'un tiers des violents tremblements de terre a provoqué des décès, en fin de siècle, cette proportion a quasiment doublé (Coburn & Spence 1992).

Plus de 90 % des tremblements de terre se produisent dans les régions du monde correspondant aux limites des plaques lithosphériques⁸ (fig.1; Balandier 2004). Deux principales zones ont été reconnues par les sismologues : la « ceinture de feu du Pacifique », suivant les chaînes de montagnes dans les Amériques de l'Ouest et traversant l'Asie dans l'axe Nord-Sud ; et la « chaîne alpino-himalayenne » (fig.2), s'étendant le long de la faille méridionale de la plaque eurasiatique, de l'Afrique du Nord jusqu'à l'Asie du Sud, en passant par les Apennins, les Alpes et l'Himalaya.

6 Un aléa naturel est un « *phénomène naturel qui peut causer des pertes de vies humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, des dommages aux biens, la perte de moyens de subsistance et de services, des perturbations socio-économiques, ou des dommages à l'environnement* » (UNISDR 2009, p.7).

7 Bien que d'après la terminologie officielle employée par les Nations Unies « *la prévention exprime le concept et l'intention d'éviter complètement les effets négatifs éventuels par le biais de mesures prises à l'avance* » (UNISDR 2009, p.24), dans le cadre de cette thèse, le terme « prévention » est considéré en tant que notion incluant également les mesures d'atténuation mises en œuvre pour limiter la gravité des conséquences résultant de l'impact d'aléas naturels. De manière générale, la prévention fait partie intégrante de la gestion des risques, cette dernière comprend également l'évaluation des risques et leur analyse.

8 Selon la théorie de la tectonique des plaques, formulée par le climatologue allemand Alfred Lothar Wegener au début du XX^e siècle, la couche externe de la Terre est formée de roches froides solides subdivisées en plusieurs plaques lithosphériques (Weidmann 2003). Sept grands fragments et une multitude de morceaux de dimensions beaucoup plus réduites flottent sur l'asthénosphère (partie ductile du manteau supérieur terrestre) et évoluent les uns par rapport aux autres : certains s'écartent, d'autres convergent, d'autres encore coulisent (Lestuzzi & Badoux 2008). Les tremblements de terre sont induits par des ruptures sur le plan de faille qui libèrent une certaine quantité d'énergie sous forme de chaleur et d'ondes se répandant dans la masse terrestre. L'énergie libérée est généralement exprimée avec l'échelle de magnitude de Richter : lorsque la magnitude augmente d'une valeur de 1, l'énergie est environ 30 fois plus importante. Le lieu du plan de faille où se produit la rupture est appelé hypocentre, tandis que le point de la surface terrestre à sa verticale est indiqué avec le terme épiceutre.

Parmi ces régions se caractérisant par une activité sismique particulièrement élevée, certaines coïncident avec des lieux qui ont été occupés par des civilisations anciennes et dans lesquels les sociétés contemporaines continuent à se développer. De fait, l'aléa sismique a depuis toujours concerné une grande partie de la population mondiale. Aujourd'hui, dans le seul continent européen, 41 millions de personnes (soit 8 % de la population) habitent dans des régions où le risque sismique est considéré comme élevé et 64 millions (13 %) dans des zones où il est estimé comme modéré⁹ (NIKER 2010).

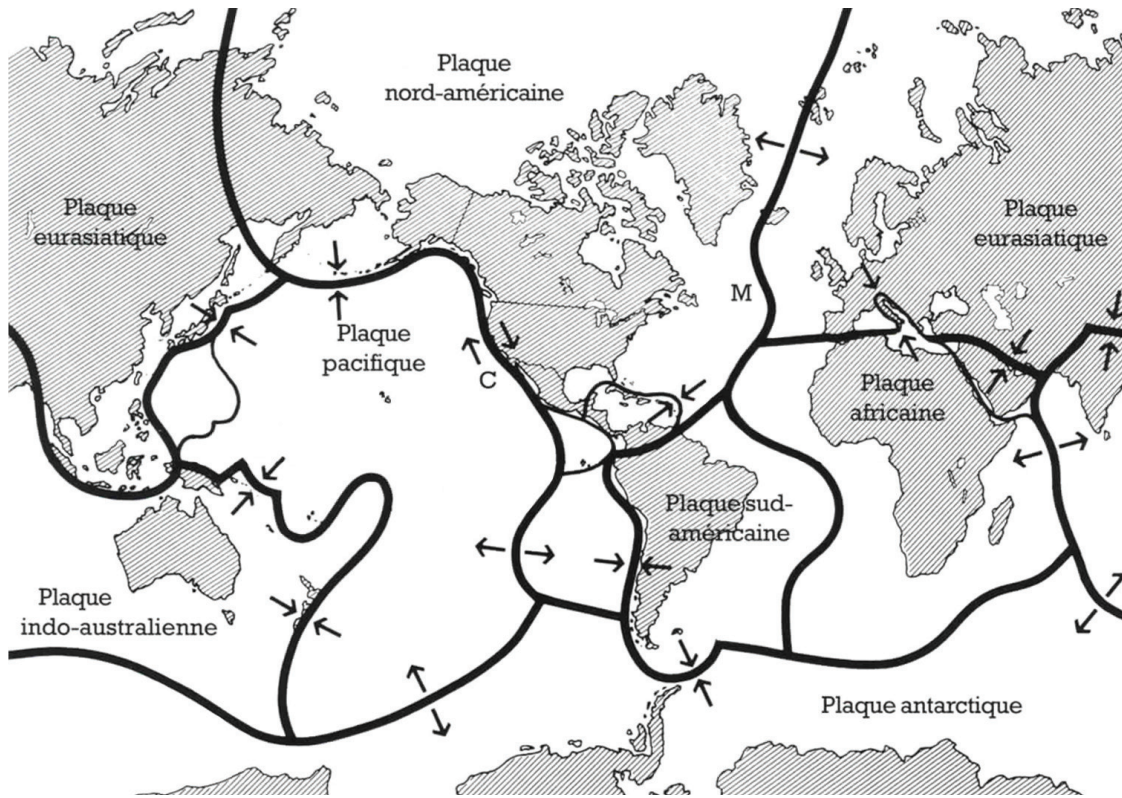


Fig.1 Les septes grandes plaques tectoniques (Source : Weidmann 2003).

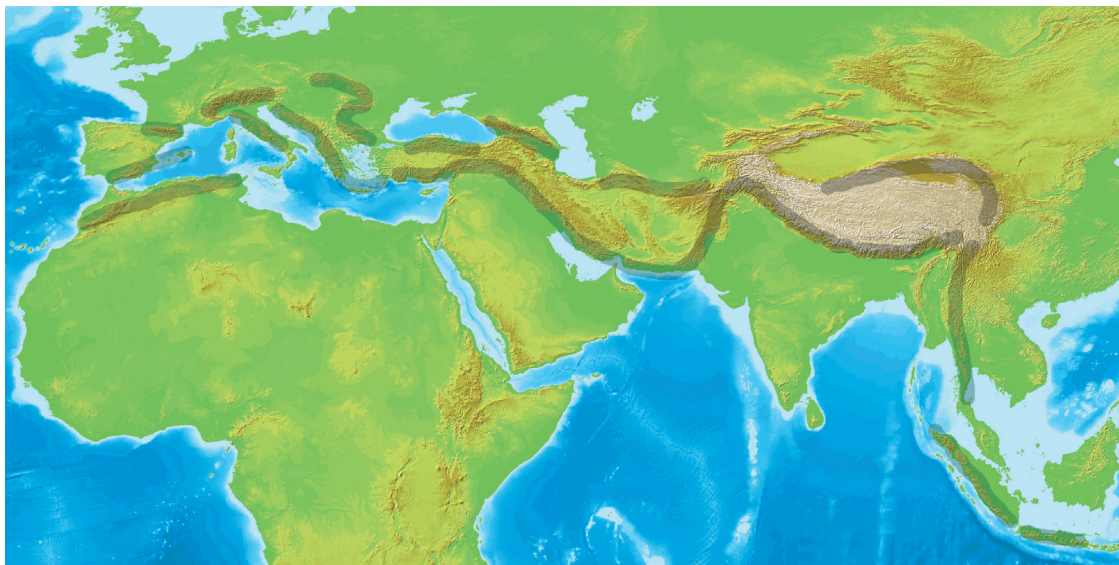


Fig.2 Carte indiquant les reliefs montagneux constituant la chaîne alpine-himalayenne (Source : carte adaptée de Allander).

⁹ Le risque sismique est généralement déterminé par les sismologues en fonction des accélérations maximales du sol pouvant survenir sur une période de 475 ans : le risque est considéré comme modéré si celles-ci ont des valeurs entre 0.08 et 0,24 g et comme élevé si elles sont supérieures (Giardini et al. 2003).

Dans de nombreuses régions assujetties à des tremblements de terre, une large partie du bâti a été édifiée exclusivement grâce à l'expérience des bâtisseurs qui se sont succédés au fil du temps, sans l'implication d'architectes ou d'ingénieurs (Arya 2000). Au niveau mondial, ce type de constructions constitue approximativement 80 % de l'environnement bâti actuel (May & Reid 2010) et, dans les zones ayant un risque sismique modéré à élevé, le pourcentage de la population qui y loge ou y travaille s'élève à 90 % (Arya et al. 2012). Par ailleurs, il est fort probable que ce pourcentage ne diminuera pas de manière significative dans un avenir très proche, en raison de la difficulté généralisée d'accéder aux services des architectes et/ou des ingénieurs (Oliver 2006a; Schacher 2008b). Cette tendance ne concerne pas exclusivement la construction *ex novo* mais également les interventions sur le bâti existant : si on considère les régions entourant le Bassin méditerranéen, l'implication des architectes ne concerne qu'un tiers du total des projets de réhabilitation, de rénovation et de réparation entrepris (Casanovas et al. 2002).

Ces « architectures sans architectes » sont généralement dénommées par la communauté scientifique avec le terme de *non-engineered structures*, en opposition à *engineered structures*, désignation indiquant les constructions ayant fait l'objet d'une validation structurelle selon des principes scientifiques¹⁰ (Rudofsky 1965; Boen & Pribadi 2009).

Parmi les architectures sans architectes, deux catégories principales peuvent être différenciées. Une se réfère aux architectures dont les procédés constructifs¹¹ ont été élaborés le long des siècles et employant des matériaux naturels, comme la pierre, le bois, le bambou, la paille et la terre. Elles sont généralement associées à des qualificatifs tels que « traditionnel », « indigène », « autochtone » et « vernaculaire »¹² (Rapoport 1969; Oliver 1997; Frey 2010). La deuxième catégorie se compose de bâtiments réalisés en adoptant des procédés constructifs élaborés beaucoup plus récemment, à partir du XX^e siècle, qui utilisent des matières naturelles et/ou de produits de fabrication industrielle, tels que le ciment et l'acier. En raison des contextes dans lesquels ces derniers procédés sont mis en œuvre, notamment dans les ensembles hétéroclites d'habitations de fortune comme certaines bidonvilles, les bâtiments compris dans cette catégorie sont associés à des appellations telles que « informel » ou « spontané » (Patton 1988).

Dans ce travail de thèse, l'attention est portée sur les architectures vernaculaires qui ont été érigées dans des régions exposées aux phénomènes sismiques, en particulier, dans les pays situés le long de la chaîne alpino-himalayenne.

10 En fait, le verbe *to engineer* signifie « concevoir et réaliser quelque chose en faisant référence aux principes scientifiques » (Source : <http://dictionary.cambridge.org>, trad. M.H.).

Dans ce document de thèse, les citations qui ont été traduites en français sont indiquées avec l'abréviation « trad. M.H. ».

11 Le terme « procédé » est défini comme le « moyen utilisé en vue d'obtenir un résultat déterminé » (Source : www.cnrtl.fr) ; dans le cadre de cette thèse, le « procédé constructif » se réfère à la réalisation d'un bâtiment et, en particulier, à la manière selon laquelle son système porteur vertical est accompli.

12 Ces architectures seront indiquées, d'or en avant, avec le qualificatif « vernaculaire ».

2. CADRE DE RÉFÉRENCE

2.1. ACTE DE BÂTIR ET RISQUE SISMIQUE

2.1.1. CULTURES CONSTRUCTIVES

Les bâtiments répondant à la définition d'architecture vernaculaire sont étroitement reliés à un ensemble de ressources cognitives et pragmatiques (savoirs et savoir-faire) et de représentations collectivement partagées, constituant un « *cadre mental collectif* »¹³ (Picon 1996, trad. M.H.). Etant à l'origine des agissements d'un groupe d'individus face aux enjeux dont il est soumis, le cadre mental collectif peut être considéré comme le fondement d'une « *culture constructive* »¹⁴, comprise en tant que « *système coordonné de savoirs, règles, procédures et habitudes entourant le processus de construction dans un lieu donné à un moment donné* » (Davis 1999, p.5, trad. M.H.).

Inévitablement, les environnements bâtis vernaculaires sont la matérialisation de références absorbées dans une culture constructive ; et cela indépendamment que l'habitat soit considéré comme lié à une quelconque représentation symbolique ou, au contraire, comme simple réponse aux besoins fondamentaux, tels que se mettre à l'abri, dormir, manger, prier, et se soucier de la perpétuité de l'espèce humaine (Oliver 2006b; Ruegg 2010).

Ces références se reflètent à plusieurs niveaux et en manières diverses. Notamment, elles se concrétisent dans le sens attribué au bâtiment, dans le processus qui le génère, ainsi que dans sa forme et sa matière¹⁵ :

- le sens se réfère à la fonction qu'un bâtiment assume comme à la connotation symbolique qui lui est attribuée par le milieu humain dans lequel il se situe. Plus spécifiquement, le bâti vernaculaire est constitué d'une série de traits constructifs variés, dont le sens dépend de la totalité du système social dans lequel ils ont été conçus et mis en œuvre (Guidoni 1975). Il en découle que les architectures peuvent être considérées comme l'expression d'un lexique particulier architectural et constructif, partagé à une certaine période donnée ;
- le processus se rapporte aux modalités selon lesquelles la conception et la réalisation d'un bâtiment sont entreprises. L'architecture vernaculaire est déterminée en premier lieu par les valeurs structurant une culture constructive ; elle est alors à considérer comme le résultat d'un processus d'élaboration basé sur des modèles constructifs de référence collectivement acceptés et partagés (Rapoport 1969) ;

13 Le « cadre mental collectif » (*collective mental frame*) est une notion utilisée par Antoine Picon (ingénieur, architecte et historien des sciences et des arts) pour indiquer un ensemble de savoirs, savoir-faire et représentations collectivement partagées, susceptible d'être à l'origine des grands changements et révolutions technologiques qui se produisent au sein des sociétés (Picon 1996).

14 Le concept de « culture constructive » a été proposé par le laboratoire Dessin-Chantier de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (France) et il a été formalisé avec la parution, en 1993, du document suivant : Doat, P., Ferro, S. & Schneegans, G., 1993. *Architecture et cultures constructives : éléments pour un pôle d'enseignement de la construction*, Villefontaine : CRAterre-EAG.

15 L'idée que l'acte de bâtir puisse être rapporté au *sens*, au *processus*, à la *matière* et à la *forme* s'inspire des recherches effectuées par Fritjof Capra, physicien américain qui a étudié les aspects philosophiques de la pensée scientifique. D'après Capra, pour comprendre toute sorte de phénomène social, il faut prendre en compte quatre perspectives conjointes se référant au processus, au sens, à la matière et à la forme. « *Par exemple, nous verrons que la culture est créée et soutenue par un réseau (forme) de communications (processus), au sein duquel le sens est généré. Les concrétisations matérielles de la culture (matière) incluent les artefacts et les textes écrits, par le biais desquels le sens est transmis entre générations successives* » (Capra 2004, p.122, trad. M.H.).

- la forme et la matière constituent les caractéristiques physiques de l'ouvrage architectural et elles sont donc à mettre en lien avec la multitude de types de structures composant l'environnement bâti. Il convient ainsi de considérer les architectures vernaculaires en relation étroite avec l'évolution des différents procédés constructifs adoptés et comme découlant de longs processus de remaniement de matières et de formes (Cataldi 1986).

Ces considérations relatives au sens d'une construction, à son processus de conception et de réalisation ainsi qu'à sa forme et à sa matière, mettent en évidence la composante culturelle d'un environnement bâti. Simultanément, elles soulignent l'importance que revêtent les modèles constructifs de référence collectivement partagés dans un lieu à un moment donné ; ceux-ci incluent les « règles de l'art » (Giuffrè 1988) qui se réfèrent à l'acte de bâtir, c'est-à-dire la « bonne manière » de construire au sein d'une culture constructive particulière.

C'est vraisemblablement par le biais de l'intuition constructive, comprise comme « *sensation pour les matériaux* » et « *sens de justesse dans leur utilisation* » (Oliver 1987), que les bâtisseurs vernaculaires ont développé des ressources cognitives permettant l'élaboration de modèles constructifs et des « règles de l'art » associées (Di Pasquale 1996). Le constructeur se laisserait donc « *diriger par son instinct, son expérience, ses observations* »¹⁶ (Viollet-Le-Duc 1856, p.56).

Encore aujourd'hui, pour saisir le fonctionnement structurel des bâtiments ainsi que pour apprécier leur résistance, il est indispensable de posséder « *une expérience 'vécue'* » qui permette de « *'sentir' le comportement de la structure étudiée* » (Zacek 2004b, p.8). « *Ce serait de la folie de croire que le progrès des études aurait pu amener au remplacement de l'intuition du constructeur par la science des structures : toutes les fois que ce péché fut commis, sont apparus l'orgueil dans les âmes et la dégénération du sens constructif dans les ouvrages* » (Arturo Danusso dans Di Pasquale 1996, p.476, trad. M.H.).

Les intuitions constructives, entendues comme « *possessions éprouvées et communes des membres d'un groupe établi* » (Kuhn 1970, p.260), reposent sur un ensemble de jugements exprimés par ces derniers sans une explicitation systématique des arguments qui les fondent (Ruegg 2010). Dans les processus de conception et de réalisation d'un ouvrage, les intuitions constituent ainsi un véritable gage de sécurité : les « règles de l'art » étant respectées, le fonctionnement structurel n'est pas compromis. D'une part, la résistance d'un ouvrage n'est pas affaiblie à cause d'éventuelles modifications inadéquates ; d'autre part, la « bonne manière » de bâtir est constamment améliorée par l'accumulation d'expériences, indiquant les aspects s'étant révélés performants et ceux qui, au contraire, ont échoué (Rapoport 1969; Oliver 1987).

Une forte valeur ajoutée peut être, de fait, associée à l'intuition constructive des bâtisseurs, garante de la bonne synthèse entre le modèle constructif de référence, les contraintes environnementales spécifiques à un site et les besoins et aspirations individuelles des habitants (Carocci 2001; Casanovas et al. 2002).

Les architectures vernaculaires non seulement reflètent un compromis entre les valeurs culturelles et des questions d'ordre technique mais, parallèlement, elles représentent une étape de l'élaboration de modèles constructifs distincts. Les procédés qui peuvent être discernés au sein du bâti seraient, en conséquence, à percevoir en tant que « produit » d'un « processus » de perfectionnement auquel de nombreux bâtisseurs ont contribué au fil des siècles et qui, dans certains cas, continue de s'opérer.

¹⁶ D'après l'architecte du XIX^e siècle Viollet-Le-Duc, l'art de construire correspond à « *satisfaire à un besoin par les moyens les plus simples et les plus solides [...] les méthodes du constructeur doivent donc varier en raison de la nature des matériaux, des moyens dont il dispose, des besoins auxquels il doit satisfaire et de la civilisation au milieu de laquelle il naît* » (Viollet-Le-Duc 1856, p.1-2).

2.1.2. CULTURES CONSTRUCTIVES PARASISMIQUES

De nos jours, les événements sismiques constituent des moments déterminants dans le processus d'adaptation de l'Homme aux caractères propres à son lieu de vie.

En effet, ils représentent des moments d'apprentissage particulièrement importants où la connaissance relative au comportement structural du bâti peut être affinée. Les leçons qui peuvent être tirées permettent non seulement l'énonciation de recommandations pour les activités de reconstruction ou de réparation mais, également, la formulation de considérations utiles à une plus grande échelle, touchant plusieurs domaines de recherche et d'application (Wenk et al. 1998; Love et al. 2004).

L'examen des effets des tremblements de terre sur le bâti a, de fait, favorisé les progrès dans la branche du génie parasismique ; des constats essentiels ont pu être effectués tant sur le comportement structural sous des sollicitations horizontales, comme sur l'efficacité des tentatives de renforcement opérés antérieurement. Si l'inspection de l'environnement construit après un séisme permet une compréhension toujours plus subtile et précise de ses effets, parallèlement l'observation de ces derniers dans l'environnement naturel amplifie la compréhension sur les mécanismes des failles tectoniques. Ou encore, l'étude des milieux humains affectés influe sur les politiques publiques de gestion des risques : des programmes de sensibilisation ainsi que des changements dans la manière d'administrer le territoire et sa composante construite peuvent en découler.

Dans une culture constructive vernaculaire, seuls des tremblements de terre s'étant produits avec une fréquence régulière auraient induit une réaction au phénomène sismique pouvant être qualifiée comme « morphogénétique », à l'instar d'une « culture de la prévention » (Ferrigni 2005). Transposée à l'acte de bâtir, la prévention implique l'adoption de mesures qui accroissent la « résistance » des environnements bâtis afin d'éviter les dégâts induits par un éventuel impact sismique (Zacek 2004a) mais, également, de solutions constructives augmentant leur « résilience » et permettant, de fait, d'atténuer les répercussions sur la stabilité et de réduire, ainsi, le risque d'effondrement (Langenbach 2013).

L'importance de la période de retour des événements sismiques se rapporte à trois aspects principaux (Ferrigni & Helly 1990; Ferrigni et al. 1993; Ferrigni et al. 2005) :

- si ces phénomènes se manifestent régulièrement, les bâtisseurs peuvent en observer les effets sur leurs ouvrages. L'expérience directe permet de saisir à la première personne les raisons et les causes de la performance des procédés constructifs adoptés et de les perfectionner au fur et à mesure. L'efficacité des mesures constructives adoptées est vérifiée et les éventuelles modifications à effectuer sont identifiées. L'importance de ces aller-retour entre observation et amélioration découle de l'intérêt de combiner de manière assidue l'expérience avec les suppositions théoriques : en effet, dans un processus d'apprentissage¹⁷, « une expérience sans théorie est tout aussi incompréhensible [...] qu'une théorie sans expérience » (Feyerabend 1988, p.183) ;
- une périodicité élevée renforce et amplifie la transmission des savoirs empiriques¹⁸ sur le comportement structural du bâti, grâce à un nombre élevé d'occasions concrètes stimulant leur partage. Les connaissances se diffusent alors plus spontanément entre générations successives de bâtisseurs, en particulier entre maître et apprenti. Les bâtiments sont ainsi ordinairement réalisés en adoptant les solutions constructives ayant prouvé leur efficacité ;

17 Selon la « courbe classique d'apprentissage humain », le niveau de capacité à résoudre un problème donné est généralement proportionnel au nombre d'erreurs commis (Woo 2011).

18 Dans le cadre de cette thèse, le terme « empirique » est employé pour qualifier le savoir qui repose essentiellement sur l'expérience.

- parallèlement, les habitants sont plus susceptibles d'assumer des comportements conformes au risque sismique, c'est-à-dire à entretenir les constructions et à ne pas effectuer des transformations architecturales pouvant les fragiliser, comme la suppression d'éléments structuraux garants de leur bonne résistance envers des éventuelles secousses.

Une période particulièrement courte de retour des événements sismiques aurait, de fait, alimenté une mémoire des habitants et des bâtisseurs vernaculaires spécifiquement corrélée au comportement structural du bâti. Ce qui a favorisé l'essor d'une « *culture sismique locale* » (Ferrigni 2005), comprise comme l'ensemble des connaissances sur les caractéristiques du choc sismique, sur les réactions du terrain et du bâti, ainsi que des comportements cohérents qui en découlent¹⁹. Dans ce cas, l'environnement bâti non seulement est réalisé en adoptant des mesures visant à réduire la portée des effets des tremblements de terre mais, de plus, il est « vécu » en adoptant des attitudes et des comportements précautionneux assurant une gestion du bâti qui intègre le risque induit par ces phénomènes.

En revanche, avec une faible fréquence des événements sismiques, les raisons amenant les bâtisseurs à certains choix constructifs, suite à l'observation des dégâts, ont davantage de risque d'être oubliées. Pendant que la mémoire des effets sismiques sur le bâti s'atténue au fil de temps, en raison de leur longue période de retour, les mesures constructives améliorant la résistance du bâti sont progressivement abandonnées. Ainsi, à l'occasion d'un nouveau tremblement de terre, les bâtiments sont renforcés avec l'ajout de dispositifs constructifs étrangers à l'ensemble bâti. Ces interventions correspondent à des « anomalies », « *éléments qui témoignent de modifications apportées à un bâtiment, qui sont en désaccord avec son style architectural et qui souvent ont des répercussions négatives sur le confort de vie et/ou réduisent la largeur de la rue* » (Ibid., p.236, trad. M.H.).

Bien que ces modifications structurales permettent d'améliorer le potentiel de résistance des constructions, leur incidence sur une culture constructive reste toutefois négligeable. En fait, l'intérêt pour les mesures de protection du bâti après un événement sismique perdure pour une durée qui est, globalement, trop courte pour que les procédés constructifs ordinaires soient modifiés en prenant en compte les effets d'éventuels tremblements de terre (Latina 1989). Ainsi, bien que le bâti existant soit renforcé, le risque sismique n'est pas nécessairement et systématiquement considéré et intégré aux pratiques courantes sur le long terme : on parle ainsi de « *culture de la réparation* » (Ferrigni 2005).

L'enracinement au sein d'une culture constructive vernaculaire de ressources cognitives et pragmatiques spécifiques au risque sismique ne dépendrait toutefois pas uniquement de la fréquence des tremblements de terre : leur intensité²⁰ entrerait également en jeu (Ibid. 2005).

Un événement sismique avec des effets sur l'environnement bâti, sans pour autant en provoquer la destruction complète, facilite la compréhension des correspondances entre les dégâts observés et les caractéristiques structurelles des ouvrages. Ceci permet de formuler des hypothèses sur les raisons de la mauvaise performance du bâti en favorisant, par la suite, l'élaboration de modifications qui améliorent l'efficacité des procédés constructifs employés.

Par contre, avec des séismes exceptionnellement violents déterminant une destruction complète au niveau local et, à l'autre bout du spectre, des secousses de faible intensité n'ayant pas des effets sur le bâti, un tel processus d'apprentissage et de perfectionnement reste marginal.

¹⁹ Cette définition de culture sismique locale a été formulée dans les années '80 par les chercheurs du Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels (CUEBC) de Ravello, Italie (Ferrigni et al. 1993).

²⁰ Aujourd'hui, l'intensité sismique est définie comme une classification de la puissance des secousses sismiques qui s'accomplit à partir des effets observables sur les objets, l'environnement bâti et naturel ainsi que sur la base des expériences vécues par les personnes. Le niveau d'intensité est déterminé en faisant référence à une échelle ; dans les pays européens, l'Échelle Macrosismique Européenne (EMS-98) est la plus utilisée (Grünthal et al. 2001). Avec cette échelle, la détermination du degré d'intensité sismique (de I à XII, en ordre croissant) s'effectue en fonction de l'importance des dégâts (de 1 à 5, en ordre croissant) subis par les différents types de structures, ainsi qu'en fonction de leur diffusion dans l'environnement bâti.

Des événements sismiques qui ont provoqué des dégâts favorisant la compréhension du comportement structural du bâti²¹ auraient donc encouragé le développement de procédés constructifs vernaculaires toujours plus performants. En outre, une périodicité élevée²² serait à l'origine de la reproduction ordinaire et spontanée des mesures de protection élaborées à ces occasions. Ainsi, en fonction de la sismicité historique des lieux, soit la fréquence et l'intensité des tremblements de terre, mais également de la sensibilité au sein du cadre mental collectif envers ces phénomènes, des pratiques qui se réfèrent étroitement au *facteur séisme* auraient émergé et des véritables « cultures constructives vernaculaires parasismiques » se seraient affinées au fil des siècles.

2.1.3. CULTURES DU RISQUE

Plus globalement, les environnements bâtis vernaculaires des régions assujetties aux tremblements de terre sont susceptibles de correspondre à l'expression d'une « culture du risque » (Oliver-Smith 1996; Shaw et al. 2008; Kulatunga 2010). Une culture du risque peut être considérée comme l'ensemble des stratégies visant à accroître la résilience des milieux humains, c'est-à-dire à renforcer leur capacité « *de résister, d'absorber, d'accueillir et de corriger les effets d'un danger en temps opportun et de manière efficace* » (UNISDR 2009, p.27). Ses composantes se réfèrent à des dimensions hétéroclites (Ferrigni et al. 2005; Caimi 2014). Elles peuvent coïncider avec des facteurs d'ordre technique améliorant la résilience du bâti et représentant la dimension constructive d'une culture du risque. D'autre part, celle-ci peut se caractériser également par des stratégies de protection sismique rapportées à une dimension comportementale incluant les comportements précautionneux des bâtisseurs et des habitants en regard au bâti, soit les conduites conformes à ses spécificités structurelles qui garantissent sa bonne performance dans le long terme. La dimension comportementale d'une culture du risque peut également être rapportée aux attitudes et mesures adoptées face aux phénomènes sismiques par la population et les institutions régissant la vie en société, pour éviter et/ou atténuer les effets induits par leur impact.

21 Notamment, des séismes d'un degré d'intensité sismique entre VIII et IX sur l'échelle de Mercalli modifiée MMI (Ferrigni et al. 1993). Ces degrés d'intensité indiquent respectivement que : les bâtiments présentent de dégâts légers s'ils sont bien construits, et des dégâts importants dans les autres cas (VIII) ; tous les bâtiments subissent des gros dommages (IX). À titre informatif, on peut préciser que les descriptions des effets sismiques relatives à l'échelle de Mercalli modifiée sont similaires à celles indiquées dans l'Echelle Macrosismique Européenne ; en fait, toutes les deux sont constituées de 12 degrés d'intensité.

22 Au moins deux événements sismiques par génération ; au sein des sociétés anciennes, cette fréquence signifiait approximativement une fois tous les 20/30 ans (Ferrigni et al. 1993).

2.2. ETUDIER LES ENVIRONNEMENTS BÂTIS VERNACULAIRES

Les architectures vernaculaires découlent de pratiques mûries au cours de multiples expérimentations (Asquith & Vellinga 2006). Elles reflètent le caractère dynamique et évolutif des systèmes traditionnels : « *la tradition n'est pas une condition statique et immuable, mais un système dynamique qui a évolué en renouvelant les éléments qui lui sont intrinsèques et dont le déchiffrement s'avère souvent difficile* » (Laureano 2008, p.182, trad. M.H.). C'est pourquoi, très souvent, les ouvrages témoignent d'une « idée » et d'une « ingéniosité » évoluées et référencées qui répondent aux caractéristiques du lieu et aux cultures d'habiter un environnement parfois dangereux : des idées et des ingéniosités qui étaient transmises selon des « *mécanismes traditionnels* », principalement sous forme orale (Oliver 2006b). Par ailleurs, la longévité des pratiques vernaculaires doit effectivement être rapportée à une « *redistribution constante* », au fil des siècles, de savoirs et savoir-faire élaborés empiriquement (Rudofsky 1979, p.13).

Toutefois, au cours du XX^e siècle, la lente régression des procédés vernaculaires en tant que pratique constructive ordinaire - en faveur de techniques plus récentes et de matériaux nouveaux - a été inévitablement suivie par un affaiblissement du processus de transmission des ressources cognitives et pragmatiques qui y étaient associées. Dans plusieurs régions, à l'échelle mondiale et spécialement dans les pays européens, celles-ci ne sont souvent plus diffusées parmi les professionnels de la construction. En conséquence, l'intelligence intrinsèque au bâti vernaculaire ainsi que les logiques qui fondent certains choix constructifs faits par les bâtisseurs du passé sont devenues difficiles à discerner²³.

En regard à une telle labilité des savoirs et savoir-faire vernaculaires, il devient indispensable de se questionner sur les approches des études du bâti ancien²⁴ et sur les méthodologies qui sont adoptées pour analyser sa capacité à faire face à des éventuelles secousses sismiques. En effet, celles-ci exercent une pression marquée sur les décisions prises en matière de gestion du patrimoine culturel architectural, sur la définition des activités de prévention du risque et, plus largement, sur la nature des interventions qui sont ordinairement effectuées sur le bâti existant (Ferrigni et al. 2005; Helly & Rideaud 2012).

2.2.1. ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DU BÂTI

Le comportement structural d'un bâtiment est généralement évalué en déterminant sa vulnérabilité sismique. Celle-ci indique la propension à subir des dégâts et, plus précisément, elle correspond à « *un caractère comportemental décrit par le biais d'une loi cause effet où la cause est le tremblement de terre et l'effet est le dégât* » (Dolce & Martinelli 2005, p.8, trad. M.H.).

Ce caractère est défini par le biais de méthodologies d'analyse qui se différencient par leur niveau de complexité mais également par leur approche (Lang 2002; Devaux 2008; Munari 2010). Ces méthodologies sont employées en fonction du nombre de bâtiments qui doivent être examinés : celles communément utilisées pour estimer la vulnérabilité sismique d'un environnement bâti, compris comme ensemble de plusieurs dizaines, centaines ou milliers de constructions, sont principalement de deux types.

Certaines méthodologies analytiques se basent sur des modélisations numériques simplifiées²⁵, dont l'intention est de simuler le comportement dynamique d'un bâtiment par le biais d'un modèle mathématique. Si elles se prêtent plutôt bien à l'analyse de la vulnérabilité de groupes de bâtiments similaires, elles ne sont, toutefois, employées que pour les structures dont le comportement en cas de séisme peut être modélisé avec un certain niveau de fiabilité. De fait, les bâtiments qui sont considérés

23 De plus, une « *amnésie de la modernité* » a souvent rendu les sociétés du passé irreprésentables, en transformant leurs produits en une « *fiction touristique-nostalgique* » dont le contenu n'est aujourd'hui guère accessible (Pietro Clemente dans Cicciozzi 2013, p.13, trad. M.H.).

24 Le bâti ancien comprend les architectures réalisées avec des procédés constructifs qui ne sont plus adoptés de nos jours : il inclut donc l'habitat vernaculaire réalisé exclusivement sur la base des compétences des bâtisseurs, mais également des ouvrages dont la conception et la réalisation ont été accomplies avec l'implication d'architectes ou d'ingénieurs de l'époque, notamment les monuments et les palais.

25 Les méthodologies analytiques qui permettent d'aboutir à des résultats très détaillés ne sont couramment pas employées pour étudier un environnement bâti en raison du temps et des ressources financières que leur mise en œuvre requiert.

pour ce type d'analyse doivent faire partie de la catégorie des « constructions mécaniquement contrôlées » (Giuffrè et al. 1993), soit des structures pour lesquelles on possède des connaissances et des compétences permettant de prévoir leur réaction sous des secousses sismiques (Doglioni & Angeletti 1994).

Ces méthodologies ne sont, donc, que très rarement adoptées pour analyser la vulnérabilité des architectures vernaculaires, en raison de la grande variabilité de ces dernières en ce qui concerne leurs propriétés structurelles et les caractéristiques des matériaux utilisés ; facteurs qui rendent très difficile la simulation de leur réponse à des éventuelles sollicitations horizontales²⁶.

Dans l'appréciation de la résistance sismique d'un environnement bâti ancien, on utilise plutôt des méthodologies d'analyse dénommées typologiques.

Celles-ci se basent sur l'élaboration statistique d'informations relatives aux dégâts sismiques subis par des bâtiments structurellement proches, considérés comme appartenant à une même classe typologique (Coburn & Spence 1992). Cette classification est généralement définie en fonction de la structure et des matériaux qui la composent²⁷. Avec cette démarche d'analyse, le comportement sismique d'une construction est décrit par le biais d'un indice de vulnérabilité qui permet d'estimer les dégâts probables en cas d'un éventuel tremblement de terre, ceci sur la base d'une relation causale²⁸ (Michel et al. 2010; Woo 2011). La formulation du pronostic de la vulnérabilité sismique d'un bâtiment coïncide, ainsi, avec la prévision de son comportement à partir de la prise en compte des « modes de rupture » distinctifs du type de structure auquel il correspond, soit sur la base d'une « piste évolutive » des mécanismes de rupture susceptibles de conduire à son effondrement (Doglioni & Angeletti 1994).

2.2.2. DÉTERMINATION DES ACTIVITÉS DE PROTECTION

Dans le processus de décision quant à la nature des activités de prévention relatives au bâti existant, ces méthodologies typologiques d'analyse de la vulnérabilité sont utilisées selon des modalités différentes en fonction des objectifs fixés. Le type des données devant être recueillies ainsi que la manière de les interpréter sont, en effet, étroitement liés aux raisons à l'origine de leur investigation (Hughes & Lubkowski 2000).

Un des objectifs de l'étude de la vulnérabilité est d'estimer les dégâts qui pourraient être induits par un tremblement de terre dans un environnement bâti donné. L'intention est de fournir aux décideurs institutionnels des données quantitatives permettant de prendre connaissance des effets possibles dans le milieu construit et sur la population, ainsi que des éventuelles répercussions au niveau économique. Dans cette optique, des procédures appelées « analyses de scénario » (*Earthquake Damage Scenario*) sont employées pour élaborer des modélisations des dégâts probables, du niveau d'un quartier jusqu'à l'échelle territoriale, afin de simuler des contextes post-séisme (D'Ayala et al. 1997; Carocci 2001; Lagomarsino et al. 2004). Ces procédures s'appuient sur l'évaluation du degré local de danger sismique, sur l'établissement d'un inventaire des bâtiments - afin de repérer leurs principales caractéristiques constructives - et sur une étude de leur vulnérabilité sismique. Cette dernière est considérée comme relative car les méthodologies d'analyse ne peuvent se baser que sur peu de paramètres en raison du nombre très grand de constructions qui doivent être considérées²⁹.

26 De nos jours, la fiabilité des méthodologies analytiques est ainsi circonscrite à seulement quelques-uns des plusieurs types de structures qui caractérisent l'environnement bâti ancien, notamment ceux dont les connaissances relatives à leur comportement sismique sont particulièrement avancées (p.e. ossature en bois). En revanche, les lacunes actuelles relatives à la performance de certains autres types de structures (p.e. maçonnerie en pierres sèches) font que l'analyse de leur vulnérabilité n'est pas forcément fiable si accomplie par le biais de modélisations numériques simplifiées.

27 Par exemple, les bâtiments en maçonnerie de pierre et ceux en ossature bois constituent deux classes typologiques distinctes (Grünthal et al. 2001).

28 Plus précisément, l'indice de vulnérabilité permet d'indiquer graphiquement, par le biais de courbes de vulnérabilité, la probabilité qu'un certain niveau de dommage se produise à l'occasion d'un séisme avec une intensité donnée.

29 La vulnérabilité des constructions examinées est généralement déterminée par le biais d'une estimation du niveau probable des dommages en fonction de l'intensité du séisme simulé, en employant des méthodologies typologiques qui permettent de leur attribuer un indice de vulnérabilité. Des méthodologies analytiques consistant à simuler le comportement structural d'un environnement bâti avec des modélisations numériques sont parfois également employées, mais seulement dans un deuxième temps. Un exemple de cette procédure d'analyse à l'échelle territoriale est celle développée dans le cadre du projet *RISK-UE* afin de créer des scénarios pour les villes européennes exposées au risque sismique (Lagomarsino et al. 2004).

Un autre objectif de l'analyse de la vulnérabilité sismique est d'identifier les bâtiments les plus susceptibles de s'effondrer en cas de tremblement de terre. L'intention est d'aboutir à des résultats quantitatifs pour chaque construction présente dans un lieu, de manière à la classer sur une échelle différenciant les ouvrages dont la résistance est retenue comme suffisante de ceux qui mériteraient d'être analysés davantage, ou qui devraient faire l'objet de travaux de consolidation sismique en vue d'empêcher leur écoulement en cas de séisme. Pour ce faire, des procédures dénommées de « dépistage visuel » (*Rapid Visual Screening*) ont été élaborées (Sinha & Goyal 2002; FEMA 2002; Kapetana & Dritsos 2007). Elles facilitent l'appréciation de la vulnérabilité des bâtiments par rapport au niveau de sismicité locale au travers d'un examen relativement rapide, depuis l'extérieur, ne nécessitant pas de calculs structuraux³⁰.

Le niveau de précision des résultats découlant de ces procédures varie de manière considérable en fonction des paramètres qui sont considérés. Le premier niveau se réfère au comportement sismique des types de structure auxquels appartiennent les bâtiments examinés. Ce niveau peut être augmenté en prenant en compte les facteurs susceptibles de modifier leur comportement en cas d'événement sismique, notamment la configuration architecturale, la qualité d'exécution, l'état actuel, les caractéristiques des matériaux et les particularités structurelles. Le niveau de fiabilité des résultats est « maximal » si l'on considère également les mécanismes de rupture probables pour chaque construction.

La nécessité d'intégrer le maximum de renseignements sur les spécificités constructives des environnements bâtis met en évidence dans quelle mesure la fiabilité des résultats varie selon les informations disponibles. Ces procédures se basent principalement sur un examen des caractéristiques structurelles observées *in situ*, mais, parallèlement, certaines d'entre elles se servent également de paramètres plus génériques, tels que la période de construction permettant d'en savoir plus sur les procédés courants à la période d'origine, et/ou des données présentes dans les dossiers établis lors de la réalisation de l'ouvrage examiné. Ces derniers incluent les plans architecturaux et les dessins techniques fournissant des informations utiles pour une meilleure compréhension des détails constructifs dissimulés dans les parties non visibles depuis l'extérieur. L'ensemble de ces démarches porte des éléments de référence permettant de considérer davantage de critères dans l'étude de la vulnérabilité du bâti, augmentant, donc, le niveau de fiabilité des résultats.

Toutefois, se référer à la période de construction ainsi qu'aux dossiers propres à chaque bâtiment sont des démarches qui conviennent pour l'étude des structures réalisées récemment - notamment le long du XX^e siècle - pour lesquelles les procédés constructifs qui étaient les plus utilisés dans une région à un certain moment donné sont connus et les plans architecturaux sont encore souvent disponibles dans les archives. En revanche, pour les architectures vernaculaires on ne dispose pas toujours de renseignements écrits relatifs à leur conception et réalisation : si pour des bâtiments importants, comme des palais et des églises, des documents peuvent exister, pour les constructions « ordinaires » composant la plupart du bâti ancien, rares sont les informations détaillées à disposition de nos jours (Helly 1995). Simultanément, les procédés constructifs qui étaient répandus pendant la période de leur réalisation ne sont pas forcément encore pratiqués ou connus. Par conséquent, un certain niveau de méconnaissance au regard des procédés employés ne permet guère la compréhension des particularités structurelles caractérisant un ouvrage à partir de sa seule date de construction. Ainsi, la quantité des données supplémentaires qui peuvent être recueillies s'avère généralement réduite.

30 D'abord, le système porteur du bâtiment étudié est associé à un type de structure auquel une valeur indicative de vulnérabilité globale a été attribuée au préalable par ceux qui ont élaboré la procédure. Ensuite, on repère les caractéristiques spécifiques à chaque bâtiment, en particulier, celles susceptibles de modifier le comportement sismique propre au type de structure correspondant. Le niveau de vulnérabilité sismique du bâtiment peut être alors calculé en combinant l'ensemble de ces renseignements selon des relations propres à la procédure utilisée. Un exemple de procédure de dépistage visuel est celle présentée dans le manuel *FEMA 154 Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards. A Handbook*, publié en 2002 par le *Federal Emergency Management Agency* (Etats-Unis).

2.2.3. ENTRE MODÈLES CONSTRUCTIFS VERNACULAIRES ET MODÈLES THÉORIQUES SCIENTIFIQUES

Les procédures utilisées pour apporter des indications relatives à la capacité du bâti à résister lors d'éventuels tremblements de terre se réfèrent à des valeurs indiquant le seuil à partir duquel les bâtiments sont considérés comme étant susceptibles de subir des dégâts importants. L'utilisation de ces « valeurs limites » souligne l'influence exercée sur la fiabilité des résultats par le niveau de connaissance relatif à la performance sismique des différents types de structures. L'actuelle dispersion des renseignements sur le comportement sismique des constructions vernaculaires, mais surtout leur nombre très limité, induisent souvent à leur association, par défaut, à des classes typologiques qui ne leur correspondent pas forcément (Grünthal et al. 2001; Woo 2011). Une telle généralisation peut amener à des indications erronées en raison de la divergence qui subsiste entre une estimation et le réel comportement sismique d'une construction vernaculaire (Decanini et al. 2004).

Plus précisément, la méthodologie d'analyse couramment employée et considérant les bâtiments en tant que membres d'une classe typologique, s'appuie sur les données relatives aux dégâts sismiques subis par les différents types de structures. L'évaluation de bâtiments affectés constitue ainsi l'activité principale pour accroître le savoir sur leur comportement sismique³¹. L'analyse des dégâts favorise, de fait, la récolte de renseignements nécessaires pour établir des relations directes entre les caractéristiques structurelles du bâti (type de mur, détails constructifs, etc.) et les dégâts qu'il présente. La répétition de cette tâche permet d'affiner toujours plus les modèles théoriques qui synthétisent de manière chiffrée la prédisposition des différents types de structure à subir des mécanismes de rupture. Elle réduit, ainsi, l'écart entre l'estimation de leur vulnérabilité et leur capacité effective à résister à des éventuelles secousses sismiques (Lagomarsino 2006; Sarà 2012).

Conceptuellement, la démarche adoptée avec les méthodologies typologiques peut être considérée comme analogue à celle qui a été - très vraisemblablement - suivie par les bâtisseurs vernaculaires, et qui les aurait amenés à perfectionner les procédés constructifs adoptés, à partir de leur seule intuition constructive et l'observation des mécanismes sur une très longue période. Le processus d'élaboration des modèles théoriques employés par les milieux scientifiques pourrait, donc, bénéficier des renseignements relatifs à l'ensemble des modèles constructifs auxquels, apparemment, les bâtisseurs faisaient référence lors de la conception et réalisation de leurs ouvrages.

Dans cette perspective, la sismographie historique peut jouer un rôle particulièrement intéressant. Visant à la compréhension de la sismicité d'un site au travers de l'analyse du bâti, cette discipline se fonde sur le principe que chaque bâtiment est le sismogramme de soi-même (Pierotti & Olivieri 2001; Ferrigni et al. 2005). De nombreuses indications peuvent alors être recueillies à propos de mesures de prévention et/ou de réparation ainsi que sur leur efficacité dans le long terme. Ce faisant, les architectures vernaculaires des régions sismiques deviendraient non seulement un « répertoire » des séismes du passé - entretemps oubliés ou jamais enregistrés³² - mais également une source précieuse d'astuces constructives adaptées à la sismicité locale.

Certaines approches méthodologiques d'étude du bâti ancien se concentrent effectivement sur la reconnaissance d'éventuelles solutions constructives mises en œuvre par les bâtisseurs vernaculaires pour augmenter la résilience de leurs ouvrages ; toutefois, celles-ci se réfèrent quasi exclusivement au domaine de la préservation du patrimoine culturel architectural (Helly & Rideaud 2012).

³¹ Les missions d'analyse des dégâts sismiques ont commencé à devenir systématiques à partir des années '80 (Coburn 1993).

³² En effet, les premiers sismographes capables d'enregistrer les mouvements du sol datent seulement de la deuxième moitié du XIX^e siècle (Fréchet et al. 2008). En outre, les sismogrammes digitaux modernes couvrent uniquement les séismes ayant eu lieu depuis le début des années '80 ; d'où la nécessité de se référer également aux sismogrammes analogues collectés auparavant ainsi qu'à la branche de recherche de la sismologie historique s'intéressant aux sources écrites anciennes, en vue d'élargir la période couverte par les données et ainsi mieux comprendre l'activité sismique d'un site.

Les recherches développées, dans les années '80, par les chercheurs du Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels (CUEBC) de Ravello (Italie) en constituent un cas très représentatif, unique dans son genre (Ferrigni et al. 2005).

Partant du constat qu'en région sismique le bâti historique est constitué d'un ensemble d'édifices qui ont survécu au fil des siècles à de nombreux tremblements de terre, une approche particulière a été élaborée et formalisée pour la définition des interventions à effectuer sur les immeubles altérés par des siècles d'usage ; ce processus a été conduit en impliquant des équipes interdisciplinaires constituées d'architectes, d'ingénieurs, d'archéologues, d'historiens et d'économistes. La recherche visait à la récupération des « cultures sismiques locales » ; l'approche développée considère le bâti en tant que « *source d'information qui nous dévoile son histoire* » et non pas seulement comme « *un objet sur lequel intervenir* » pour augmenter sa résistance (Ferrigni et al. 1993, p.3). Elle repose ainsi sur des études pluridisciplinaires à l'échelle de l'environnement bâti, « *afin de retrouver la raison d'être d'une technique ou d'une modification particulière* » et, donc, de déceler son caractère parasismique (Ibid., p.4). En vue de permettre une meilleure interprétation des qualités et des défauts propres aux architectures vernaculaires, les recherches menées approfondissent les caractéristiques constructives d'un ensemble de bâtiments en relation à leur comportement structural en cas de tremblement de terre (Ferrigni & Helly 1990) ainsi que les spécificités du territoire et, en particulier, la sismicité historique des lieux (Pierotti & Ulivieri 2001). Cette démarche présente en outre un aspect qui, de nos jours, assume un rôle de premier plan dans le processus de renforcement de la résilience des milieux humains. En explorant et valorisant les particularités qui ont permis au bâti de survivre aux nombreux événements sismiques, elle vise à sensibiliser les professionnels de la construction, les autorités gouvernementales ainsi que la population sur l'importance d'assumer des comportements qui ne compromettent pas la performance, notamment, l'entretien régulier et des interventions structurellement appropriées.

La composante « historique » d'une telle approche d'examen du bâti existant la distingue des méthodologies d'analyse normalisées, habituellement employées pour effectuer une estimation des dommages sismiques ou pour classer les structures en fonction de leur probabilité d'effondrement en cas de tremblement de terre. À la différence de ces dernières, qui reposent essentiellement sur l'étude des propriétés structurelles des bâtiments, l'« approche de Ravello » repose sur une lecture de la vulnérabilité des environnements bâtis qu'on pourrait être amené à qualifier comme se situant entre modèles théoriques scientifiques et modèles constructifs vernaculaires. En effet, la vulnérabilité des ouvrages est examinée sur la base des connaissances contemporaines en matière de génie parasismique, tout en cherchant également de comprendre les raisons qui fondent les choix effectués par les bâtisseurs.

Force est pourtant de constater qu'aujourd'hui, cette approche n'est pas très répandue. De manière générale, cette perspective est à mettre inévitablement en lien avec un certain « désintéressement » de la part des milieux scientifiques pour la composante technique des cultures populaires³³ ainsi qu'aux préjugés qui peuvent subsister au sein des sociétés contemporaines à l'égard de celles dites « primitives »³⁴ (Diamond 2009; Langenbach 2009; D'Antonio 2013). En effet, les recherches consacrées aux architectures vernaculaires se focalisent surtout sur leur *sens*, sur le *processus de conception* ou sur la *forme* ; très rares sont les approfondissements sur leur *processus de réalisation* ou sur leur *matière*, c'est-à-dire sur les questions d'ordre technologique intrinsèques à une culture constructive. Ainsi, le phénomène sismique n'est pas toujours et systématiquement considéré comme un facteur qui pouvait avoir été pris en compte par les bâtisseurs et, donc, comme intégré dans leurs ouvrages ; les éventuelles corrélations entre les caractéristiques du bâti vernaculaire et la sismicité historique ne sont, de fait, que très rarement examinées.

33 La distinction entre cultures populaires et milieux scientifiques se rapporte à la différenciation qui est généralement effectuée au niveau épistémologique entre la connaissance populaire et la connaissance scientifique : la première serait considérée « *en rupture partielle* » avec la deuxième en raison du fait qu'elle inclue la « *perception sensorielle* » (Gagnon & Hébert 2000, p.14).

34 Par exemple, « *aux yeux des explorateurs et des colonisateurs européens, les habitants des hautes terres de Nouvelle-Guinée étaient des 'primitifs' [...] Mais ce 'primitivisme' apparent était trompeur, car on s'aperçut que leurs méthodes agricoles étaient en réalité sophistiquées, à tel point que les agronomes européens d'aujourd'hui ne comprennent toujours pas, dans certains cas, les raisons pour lesquelles les méthodes des Néo-Guinéens fonctionnaient alors qu'échouèrent les innovations agricoles que des Européens pétris de bonnes intentions tentèrent d'appliquer dans le pays* » (Diamond 2009, p.457-458).

2.2.4. ENTRE FACTEURS DE VULNÉRABILITÉ D'ORDRE TECHNIQUE ET CULTUREL

Bien que la capacité des constructions à faire face aux secousses sismiques soit définie par les caractéristiques structurelles qui leur sont propres, la résistance et la résilience d'un environnement bâti sont, néanmoins, dialectiquement liées aussi bien à des aspects techniques qu'aux spécificités du milieu humain, qui peut de fait induire un accroissement ou une réduction de sa vulnérabilité. En effet, « *ce n'est pas simplement la qualité ou la solidité d'un bâtiment qui est en jeu mais plutôt sa vulnérabilité dynamique, un concept qui a des connotations sociales et historiques* » (Helly 1995, p.792) car étroitement lié à des facteurs culturels. Ceux-ci se rapportent à plusieurs aspects parmi lesquels la façon dont les lieux sont habités et vécus, les comportements humains adoptés en regard du bâti, les processus sociétaux au sein des communautés, les spécificités du tissu social, les ressources cognitives et pragmatiques disponibles ainsi que les valeurs culturels répandus (Oliver-Smith 1996).

En dépit des intérêts qu'une approche d'étude se situant entre facteurs de vulnérabilité d'ordre technique et culturel peut assumer en vue de mieux cerner les aspects déterminant le niveau effectif de sécurité de la population envers le risque sismique, sa diffusion et application restent à l'heure actuelle très marginales, voire restreintes à des cas temporellement et géographiquement limités (Ferrigni 2005; Helly & Rideaud 2012).

2.3. DÉCRYPTER LE LIEN ENTRE ARCHITECTURE VERNACULAIRE ET *FACTEUR SÉISME* : PROBLÉMATIQUES, PERSPECTIVES ET QUESTIONNEMENTS

Les constats relatifs aux architectures vernaculaires et aux différentes approches d'étude de leur vulnérabilité sismique m'ont conduit à développer une recherche concevant les environnements bâtis anciens en tant qu' « œuvres » résultantes de véritables cultures du risque. De l'adoption de ce point de vue découle l'intérêt de « décrypter » le lien entre architecture vernaculaire et *facteur séisme*.

Le terme « décrypter » est ici entendu en tant que processus d'identification des mesures adoptées par les sociétés du passé et de compréhension des raisons qui leur sont sous-jacentes, en vue d'une valorisation dans la pratique contemporaine des intelligences intrinsèques aux environnements construits existants.

Le décryptage devient donc un processus de reconnaissance des corrélations entre les cultures constructives vernaculaires et les phénomènes sismiques, reliant la dimension culturelle, structurelle et cognitive de l'acte de bâtir en zone à risque. Une telle démarche contribue directement à favoriser une meilleure prise en compte de l'ensemble des facteurs influençant la vulnérabilité du bâti vernaculaire actuel, en réduisant ainsi la probabilité que leur résilience soit affaiblie par une gestion du patrimoine architectural inadéquate face au risque sismique.

Dans le cadre de cette recherche le décryptage du lien entre l'architecture vernaculaire et le *facteur séisme* a été effectué en adoptant trois perspectives distinctes.

- Perspective 1 : l'architecture vernaculaire comme matérialisation d'aspects culturels étroitement corrélés au *facteur séisme*. Les caractéristiques du bâti peuvent résulter de cultures constructives vernaculaires qui ont porté une attention particulière au risque et aux conséquences induites par différents aléas naturels. Depuis cette perspective, l'environnement bâti peut alors être perçu comme un milieu imprégné de stratégies de résilience qui se rapportent, d'une part, à des mesures constructives réduisant la vulnérabilité des artefacts et, de l'autre, à des attitudes et des comportements précautionneux adoptés par les populations.
- Perspective 2 : l'architecture vernaculaire en tant que concrétisation de choix constructifs étroitement corrélés au *facteur séisme*. Les différentes particularités structurelles du bâti peuvent trouver leurs raisons d'être dans des phénomènes naturels ordinaires, mais également dans ceux beaucoup plus exceptionnels et souvent très imprévisibles, comme les aléas naturels. Depuis cette perspective, l'environnement bâti peut ainsi être examiné en tant que témoin de solutions constructives adaptées à la sismicité historique des lieux et, donc, à la puissance et à la fréquence des tremblements de terre s'étant produits au fil des siècles.
- Perspective 3 : l'architecture vernaculaire comme manifestation de connaissances empiriques étroitement corrélées au *facteur séisme*. Les variantes constructives présentes dans le bâti peuvent résulter d'un processus de perfectionnement des compétences des bâtisseurs au regard de son comportement structural lors de l'impact d'aléas naturels. Depuis cette perspective, l'environnement bâti peut donc être étudié comme étant l'expression de savoirs et savoir-faire se rapportant aux effets induits par des sollicitations horizontales sur les constructions et, en particulier, aux mécanismes de rupture qui leur sont propres.

Les questionnements qui surgissent de l'adoption d'une telle approche sont multiples et de nature variée ; certains ont constitué le point de départ pour le développement de cette recherche, tandis que d'autres ont surgi au cours du travail.

- Les cultures du risque sont étroitement liées à un ensemble de savoirs et savoir-faire ainsi qu'à des représentations collectivement partagées, les questions d'ordre technique se superposent par conséquent à des facteurs d'ordre culturel. Parmi ces derniers, quels sont ceux qui exercent une influence accrue sur les réponses apportées par les sociétés anciennes et contemporaines pour se protéger des aléas naturels auxquels elles ont été et sont encore aujourd'hui exposées? De nos jours, les savoirs empiriques constitués dans le passé ont-ils encore une incidence sur les comportements individuels et collectifs face au risque sismique ?
- Dans les régions sismiques, de nombreuses constructions vernaculaires sont encore présentes de nos jours et elles ont, de fait, survécu à des multiples tremblements de terre qui se sont produits au cours des siècles. Ces architectures se caractérisent par des types de structures et des matériaux très hétérogènes. Dans cette diversité constructive, peut-on identifier des similitudes entre des zones géographiques éloignées ? Le cas échéant, y a-t-il des modèles constructifs et des « règles de l'art » suivies par l'ensemble des bâtisseurs vernaculaires ? Et dans des régions avoisinantes mais dont la sismicité historique n'est pas équivalente, subsiste-t-il des variations dans l'acte de bâtir qui peuvent être rapportées aux spécificités des phénomènes sismiques ?
- La configuration architecturale, les éléments structuraux, les détails constructifs, outre que les matériaux utilisés, font qu'au sein d'un ouvrage, s'engendre un ensemble de réactions qui lui permettent de résister - plus ou moins bien - aux contraintes induites par des sollicitations extérieures. Quelles sont les corrélations entre le comportement dynamique des différents ouvrages et les particularités structurelles qui les caractérisent ? Peut-on identifier des types de structures vernaculaires possédant un caractère parasismique ?
- Les savoirs et savoir-faire corrélés aux procédés constructifs vernaculaires ne sont, en grande partie, plus transmis selon les mécanismes traditionnels d'échange entre générations de bâtisseurs, alors que les milieux scientifiques ont commencé à s'intéresser au comportement sismique du bâti vernaculaire seulement à partir des dernières décennies du XX^e siècle. Comment compenser une telle labilité des connaissances et compétences liées aux procédés constructifs vernaculaires et à la performance sismique des différents types de structures ? Comment le bâti ancien peut-il être examiné en vue de favoriser une estimation et une compréhension approfondie et fiable de sa capacité à faire face aux futurs tremblements de terre ?

3. CADRE DE LA RECHERCHE

3.1. HYPOTHÈSE DE TRAVAIL

Une méconnaissance au regard des cultures constructives vernaculaires ayant généré les environnements architecturaux existants et, spécialement, de leur corrélation avec le phénomène sismique augmente la probabilité que les interventions sur le bâti ancien et les activités de prévention ne bénéficient guère des potentialités intrinsèques à chaque milieu, risquant même d'en déterminer une vulnérabilité accrue.

L'investigation de cette problématique s'est fondée sur l'hypothèse de travail suivante : décrypter le lien entre l'architecture vernaculaire et le *facteur séisme* depuis des perspectives centrées sur les aspects culturels, structurels et cognitifs, contribuerait à réduire la vulnérabilité des populations et des environnements bâtis anciens, grâce à une compréhension approfondie et à une connaissance fine des principes qui régissent leur résilience.

Cette recherche a visé à mettre en exergue les questionnements et les argumentaires favorisant la reconnaissance de l'ingéniosité inhérente aux cultures constructives du passé et stimulant leur valorisation dans la pratique actuelle.

3.2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

3.2.1. AXES DE RECHERCHE

L'examen de l'hypothèse de travail s'est accompli par le développement de trois axes de recherche qui reflètent les perspectives d'analyse du lien entre l'architecture vernaculaire et les phénomènes sismiques, identifiées dans le cadre de référence.

- Axe 1 : Déterminants culturels parasismiques

Le premier axe de recherche s'intéresse aux aspects qui exercent une influence marquée sur les réactions des sociétés anciennes et contemporaines aux phénomènes sismiques ; ceci en se focalisant sur ceux qui agissent au niveau de la perception du risque. Les rôles des institutions publiques, des milieux scientifiques et des cultures populaires ont été considérés afin de comprendre leur interférence à cet égard. L'attention a été portée sur les aspects clés pouvant être qualifiés comme des déterminants culturels « parasismiques », en raison de leur apport substantiel dans la résilience.

L'intention a été de reconnaître les modalités selon lesquelles les cultures du risque élaborées au cours des siècles interagissent avec celles plus récentes dans la détermination de la résilience des sociétés actuelles, en vue de saisir le rôle effectif et/ou potentiel des stratégies vernaculaires dans la réduction de la vulnérabilité des milieux humains et des environnements bâtis contemporains.

- Axe 2 : Types de structures parasismiques

Le deuxième axe de recherche se focalise sur les types de structures vernaculaires pouvant être qualifiés comme parasismiques, en raison de leur bonne performance lors de tremblements de terre produits dans un passé lointain et/ou plus récent. L'attention a été portée sur les traits distinctifs des systèmes porteurs verticaux ainsi que sur les caractéristiques susceptibles d'être à l'origine de leur bon comportement sismique.

L'intention de cette analyse est double. D'un côté, il s'agissait de mettre en évidence les facteurs d'ordre constructif qui contribuent à améliorer la capacité des architectures vernaculaires à résister à des sollicitations horizontales, en vue de leur appréciation et prise en compte. D'autre côté, il s'agissait d'explorer les modalités d'identification des solutions parasismiques présentes au sein des cultures constructives, en vue de leur reconnaissance et d'une valorisation des qualités intrinsèques aux environnements bâtis anciens.

- Axe 3 : Ressources cognitives parasismiques

Le troisième axe de recherche se focalise sur les ressources cognitives relatives à un procédé constructif particulier, traditionnellement répandu dans plusieurs régions sismiques : l'intégration d'éléments horizontaux en bois dans les murs en maçonnerie. L'attention a été portée sur le savoir découlant de recherches scientifiques quant au comportement statique et dynamique de ce type de structure, comme aussi sur l'examen des solutions adoptées par les bâtisseurs vernaculaires. Un double objectif est à la base de cette analyse. D'une part, elle a visé à appréhender les principaux facteurs d'ordre constructif qui déterminent l'efficacité sismique du procédé et qui favorisent une compréhension fine de la vulnérabilité des structures ainsi réalisées. D'autre part, le travail conduit a également concerné les modalités avec lesquelles les connaissances relatives à son caractère parasismique sont acquises et pourraient être davantage approfondies et renforcées.

3.2.2. ETUDES DE CAS

Pour chaque axe de recherche, une investigation sur le terrain a été conduite afin d'approfondir certains éléments identifiés comme représentatifs de l'interdépendance entre les cultures vernaculaires et les phénomènes sismiques. Le propos de ces études de cas a été d'apporter une contribution à la réflexion générale, par le biais d'observations localisées du réel. Les analyses *in situ* se sont déroulées dans trois différents lieux, sélectionnés en relation à l'intérêt qu'ils présentent par rapport aux thématiques traitées dans chaque axe de recherche et aux sujets qui y sont corrélés (tab.1).

- Etude de cas 1 : Province de L'Aquila, Italie

La première étude de cas découle d'une volonté d'investiguer davantage l'influence des cultures du risque « anciennes » sur la détermination de la résilience sismique des sociétés actuelles. Elle s'intéresse tant aux architectures vernaculaires qui ont résisté à des tremblements de terre qu'à la connaissance populaire à l'égard de leurs spécificités structurelles, en examinant les principaux facteurs qui influent et stimulent la perception du risque au sein d'une population.

L'étude sur le terrain a été conduite dans la province de L'Aquila, en Italie centrale : une région composée en grande partie de constructions édifiées au cours des siècles et soumises, au fil du temps, à des puissants tremblements de terre. Le dernier grand séisme qui a provoqué des effets importants date de 2009, un événement qui a fait jaillir au niveau local une attention davantage accrue à l'égard des problématiques liées à ce type d'aléa naturel. Le choix de ce site dérive également de la nécessité, déterminée par les aspects définis pour cette investigation, d'une communication directe et aisée avec la population locale : une région italophone (langue maternelle de l'auteur de la présente thèse) a donc été préférée.

- Etude de cas 2 : Territoire de la faille nord anatolienne, Turquie

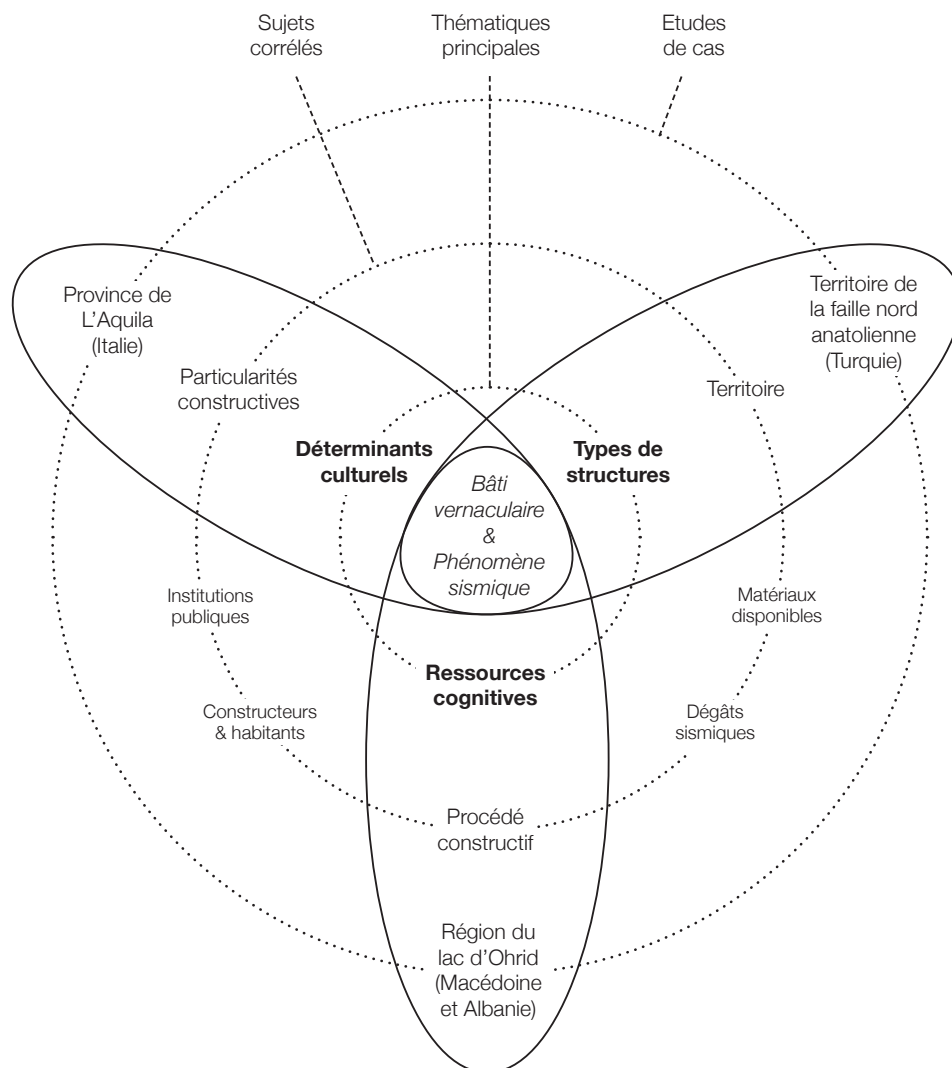
La deuxième étude de cas porte sur la reconnaissance des corrélations entre les caractéristiques du bâti et l'activité sismique de sites particuliers, en vue de dégager les particularités structurelles susceptibles d'avoir été élaborées et adoptées par les bâtisseurs vernaculaires pour augmenter la résilience des ouvrages ; particularités qui peuvent, de ce fait, exercer une incidence marquée sur leur comportement dynamique. Cette analyse s'intéresse au lien entre les propriétés des environnements bâtis et les sismicités historiques des lieux, à travers un examen de la récurrence et de la diffusion territoriale des particularités structurelles ainsi qu'une mise en évidence des diversités constructives caractérisant des ouvrages avec des systèmes porteurs verticaux similaires.

L'étude sur le terrain a été conduite dans le territoire le long de la faille nord anatolienne, dans la Turquie septentrionale. Ce territoire correspond à une très vaste zone géographique où le bâti se caractérise par une grande hétérogénéité architecturale et où la sismicité historique peut considérablement varier entre les différents lieux. Ces deux aspects en font un cas de figure particulièrement intéressant pour une analyse qui vise à saisir les variations constructives subsistant entre des régions avec un niveau de sismicité divergeant.

- Etude de cas 3 : Région du lac d'Ohrid, Macédoine et Albanie

La troisième étude de cas se focalise sur le procédé constructif consistant à intégrer des éléments horizontaux en bois dans les murs porteurs en maçonnerie. L'intérêt est d'explorer les modalités avec lesquelles les bâtisseurs vernaculaires ont mis en œuvre ce procédé ainsi que d'investiguer la performance sismique des différentes variantes élaborées, afin de saisir les aspects qui augmentent ou réduisent la vulnérabilité des architectures ainsi édifiées. Cette investigation se concentre sur les effets auxquels ces architectures sont exposées en cas de tremblement de terre, par une analyse *in situ* des dégâts sismiques et un examen des particularités structurelles permettant d'empêcher la formation de mécanismes de rupture.

L'étude sur le terrain a été conduite dans la région du lac d'Ohrid, partagée entre la Macédoine et l'Albanie. Dans ce territoire le procédé considéré a été traditionnellement utilisé avec une fréquence particulièrement élevée par rapport aux autres endroits où il a été documenté. En outre, cette région a été historiquement affectée par de nombreux événements sismiques de puissance modérée et elle présente, de fait, une activité sismique susceptible d'avoir favorisé le développement, au fil du temps, de connaissances accrues parmi les bâtisseurs vernaculaires sur les mécanismes de rupture auxquels les constructions sont exposées.



Tab.1 Thématiques principales et sujets corrélés qui ont été traités dans le cadre de cette thèse, avec indication de ceux approfondis dans les trois études de cas.

Au-delà des caractères particuliers propres aux contextes sélectionnés, ces trois études de cas présentent deux aspects en commun, l'un se référant aux environnements bâtis, l'autre au niveau de risque sismique.

D'une part, le bâti de régions étudiées se compose en grande partie d'architectures vernaculaires dont les procédés constructifs, traditionnellement adoptés le long de plusieurs siècles, ne sont plus employés couramment. Le choix de considérer ce cas de figure découle de l'intérêt de se référer à des contextes dans lesquels les ressources cognitives et pragmatiques à leur égard ne sont plus forcément transmises. C'est, en effet, dans ce genre de situations qu'un processus de décryptage du lien entre l'architecture vernaculaire et le *facteur séisme* présente un intérêt en vue de déceler et mettre en valeur les qualités intrinsèques au bâti existant.

D'autre part, les sites sélectionnés se situent le long de la chaîne alpino-himalayenne, zone sismiquement très active s'étendant du bassin méditerranéen jusqu'à l'Asie du Sud. Plus précisément, ils correspondent à des régions où le risque sismique est jugé élevé ; les accélérations du sol pouvant survenir sur une période de 475 ans ont été estimées comme particulièrement fortes (Giardini et al. 2003) et le niveau d'intensité sismique maximale probable a été estimé équivalent ou supérieur à VIII (fig.4b; Munich Re Group 2009). Ce niveau d'intensité est significatif car c'est à partir de ce degré que l'environnement bâti présente des dégâts structurels importants, voire une destruction partielle. D'ailleurs, les tremblements de terre avec une telle intensité sont considérés, dans la littérature scientifique, comme des événements sismiques à caractère destructeur.

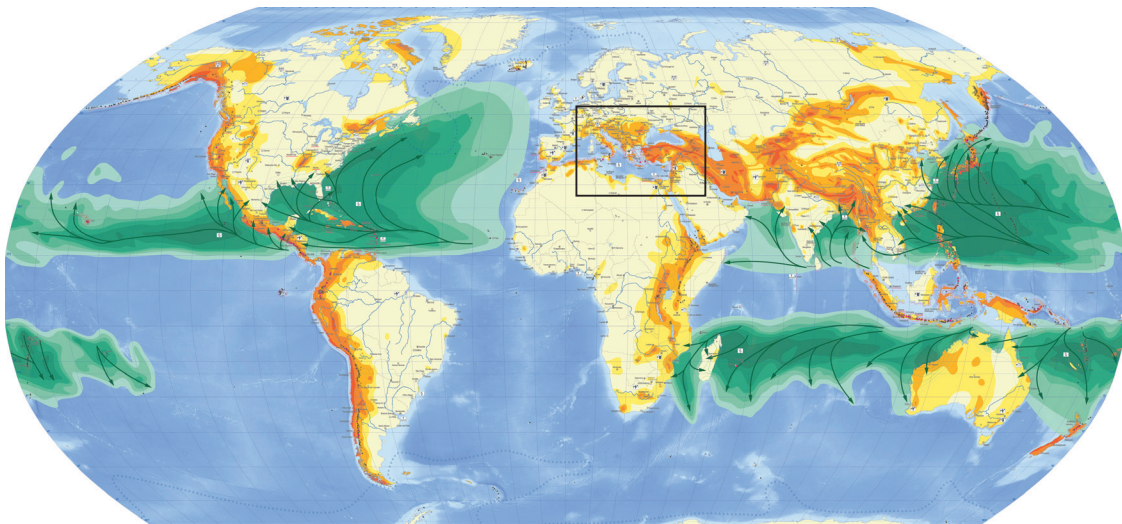
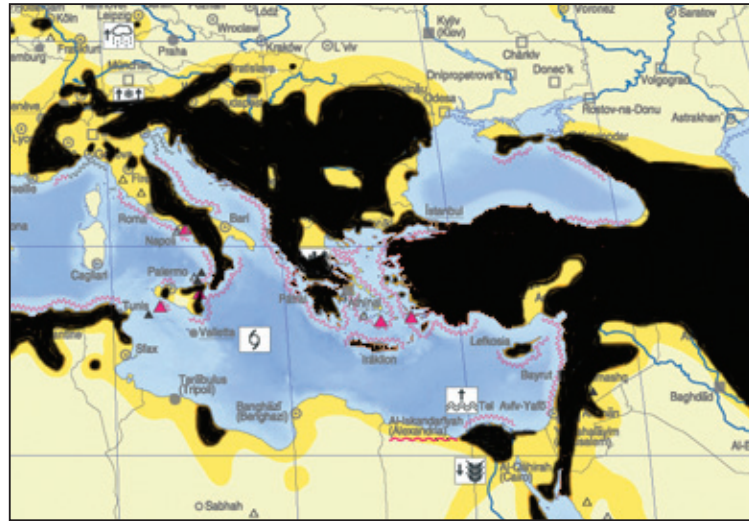
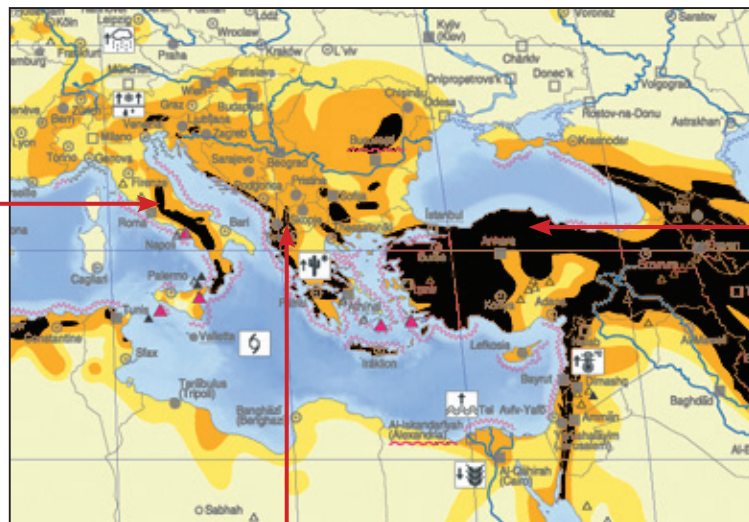


Fig.3 Carte mondiale du niveau d'exposition aux tremblements de terre, du jaune au rouge en ordre croissant (Crédit : Munich Re Group).



VII
Niveau d'intensité sismique
VIII



Province de
L'Aquila
(Italie)

Territoire de la faille nord
anatolienne
(Turquie)

Région du lac d'Ohrid
(Macédoine et Albanie)

Fig.4 Cartes du versant oriental du bassin méditerranéen, indiquant les zones (noir) où il y a le 10 % de probabilité de dépassement des niveaux VII (a) et VIII (b) d'intensité sismique, pour un temps d'exposition de 50 ans (Source : cartes adaptées de Munich Re Group).

3.2.3. MÉTHODE DE TRAVAIL

La recherche en thèse a été conduite en alternant l'exploration des thématiques identifiées dans les trois axes de recherches avec le travail relatif aux études de cas, à leur préparation, à l'analyse sur place et au traitement des données recueillies. Ces phases se sont succédées tout au long des 4 années de thèse en déterminant une forte influence réciproque entre les renseignements théoriques et la définition des activités sur le terrain, ainsi qu'entre les réflexions élaborées pendant l'exploration des trois différents axes de recherche.

L'approfondissement des thématiques abordées s'est fondé sur une revue de la littérature, à partir de textes se référant à plusieurs disciplines : architecture, génie parasismique, sismologie, anthropologie, gestion et prévention du risque. Des ouvrages de nature diverse ont été consultés et les éléments identifiés évalués par un croisement de sources d'information, afin d'aborder les thématiques sous plusieurs points de vue.

En particulier, des données d'ordre technique au regard des différents types de structures vernaculaires ont été combinées avec des renseignements sur la sismicité historique des lieux dans lesquels elles ont été documentées. La consultation de répertoires sur les événements sismiques anciens et contemporains s'est révélée indispensable afin de comprendre la sismicité historique des différentes zones géographiques et, en particulier, des territoires considérés pour les études de cas. Ces renseignements ont permis de déduire le niveau de prise en compte du phénomène sismique par les bâtisseurs vernaculaires, à partir de la récurrence et de l'intensité des tremblements de terre. En effet, la notion de « culture sismique locale » (Ferrigni 2005), telle qu'élaborée par les chercheurs du CUEBC de Ravello (Italie), a été considérée en tant qu'outil méthodologique : un « échafaudage conceptuel » ayant guidé l'exploration de l'hypothèse de travail (Judge 1994).

Le travail de recherche a bénéficié de l'accès à plusieurs ouvrages, parmi lesquels ceux faisant partie du fonds d'architecture vernaculaire présent au sein de la faculté de l'Environnement naturel, architectural et construit (ENAC), à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)³⁵.

Les références employées proviennent également d'autres types de sources, tels que des articles publiés à l'occasion de conférences et séminaires internationaux consacrés à l'histoire de l'architecture, au bâti ancien et/ou au génie parasismique.

Certains des documents consultés ont été écrits par des personnes (notamment architectes) travaillant sur le terrain pour des organisations d'aide humanitaire et relatant de projets de reconstruction ou de programmes de prévention ; d'autres ont été élaborés par des chercheurs (notamment en génie civil) et concernent des analyses sur la résistance sismique du bâti ancien.

Des plateformes et sites internet conçus en tant qu'encyclopédies illustrant les pratiques constructives - vernaculaires et non - ont également été consultés³⁶.

Ce document de thèse inclut des références à des exercices et à des essais de laboratoire qui ont été conduits à l'EPFL, dans le cadre du cours de l'Unité d'enseignement ENAC intitulé *Apprendre du vernaculaire_la terre crue*, dont les responsables ont été le Prof. Pierre Frey et l'auteur de cette thèse³⁷.

35 Ce fonds est un ensemble de livres et d'environ 700 maquettes à une échelle 1:20 réalisées par les étudiants en architecture de l'EPFL. Les photos des maquettes ainsi que les données propres aux constructions auxquelles elles se rapportent sont accessibles à l'adresse internet <http://learning-from-vernacular.epfl.ch>.

36 Parmi les sites internet consacrés au bâti existant en zone sismique, on peut mentionner la plateforme dénommée *World Housing Encyclopedia* élaborée par l'institut EERI (*Earthquake Engineering Research Institute*) et l'association IAEE (*International Association for Earthquake Engineering*) présentant une collection de fiches décrivant certains parmi les types de structures présents dans des régions sismiques. Cette plateforme est accessible à l'adresse www.world-housing.net.

37 Ce cours a été dispensé par le laboratoire des Archives de la construction moderne (ACM) de l'Institut d'architecture et de la ville (IA) et il était adressé aux étudiants de 3^{ème} année (Bachelor) de la faculté ENAC, dont font partie les sections d'architecture (SAR), de génie civil (SGC) et des sciences et ingénierie de l'environnement (SSIE).

En outre, le travail de recherche a pu compter sur de nombreuses communications personnelles avec des chercheurs des milieux académiques³⁸, des architectes et ingénieurs travaillant (ou ayant travaillé) dans des régions assujetties aux tremblements de terre³⁹ ainsi que des représentants d'institutions gouvernementales⁴⁰. Ces échanges ont eu lieu tout au long du travail de recherche en Suisse comme pendant les analyses *in situ* en Italie, en Turquie et en Macédoine, et lors de séminaires scientifiques et conférences internationales en Suisse⁴¹, en France⁴² et au Portugal⁴³.

En ce qui concerne le déroulement des études de cas, les séjours sur le terrain ont eu lieu en juin 2012 (Macédoine et Albanie), août 2012 (Turquie) et juillet 2013 (Italie), avec dans chaque cas une durée d'environ 1 mois sur place.

Les villes et villages visités ainsi que la nature des analyses effectuées ont été planifiés sur la base de recherches effectuées au préalable, au regard des caractéristiques de l'architecture vernaculaire régionale et de l'activité sismique des lieux. Une fois sur place, des changements dans le programme établi se sont parfois avérés nécessaires ou pertinents, pour plusieurs raisons : d'une part, l'accessibilité effective des sites, et, d'autre part, des imprévus qui ont déterminé une réadaptation des activités. Parmi ces derniers, en particulier, deux tremblements de terre qui ont eu lieu pendant mon séjour en Macédoine et qui m'ont permis d'effectuer une analyse détaillée des dégâts sismiques subis par le bâti.

Lors des investigations sur le terrain, le travail a porté principalement sur des observations directes du bâti ainsi que sur des échanges avec les habitants, des chercheurs universitaires et des représentants d'institutions locales en charge de la conservation du patrimoine architectural⁴⁴. Une fois le travail sur le terrain achevé, des recherches supplémentaires relatives à des sujets corrélés aux thématiques principales et dont l'importance a émergé seulement une fois sur place, ont permis d'alimenter les réflexions générales en apportant des éléments nouveaux.

Les activités développées et la nature des sources d'informations sont davantage détaillées dans les différentes parties de ce document, notamment lors de la présentation des études de cas.

38 Le déroulement de cette thèse a pu compter sur des discussions avec les chercheurs suivants : anthropologue Antonello Ciccozzi, Université des Etudes de L'Aquila (Italie) ; ingénieur Ferruccio Ferrigni, Centre Universitaire Européen pour les Biens Culturels de Ravello (Italie) ; architecte Melania Sherdenkovska, Université Saints-Cyrille-et-Méthode de Skopje (Macédoine) ; architecte Annalisa Caimi, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (France).

39 En particulier, des rencontres ont eu lieu avec les architectes Tom Schacher et Marina Marinov travaillant pour la Direction du développement et de la coopération Suisse (DDC), organe du Département fédéral des affaires étrangères, en charge de l'aide humanitaire.

40 Les personnes rencontrées qui travaillent pour la conservation du patrimoine architectural au sein d'institutions gouvernementales, sont les suivantes : architecte Gianfranco D'Alò, bureau de la Soprintendenza pour les Biens Architecturaux et Paysagistiques des Abruzzes (Italie) ; architecte Christophe Valentini, Office cantonal de la protection des biens culturels, canton du Valais (Suisse) ; historien de l'art Volkan Şenel, bureau de la Direction des Sites Historiques de la Municipalité Métropolitaine de Kocaeli (Turquie).

41 *The 2014 Tech4Dev, International Conference, UNESCO Chair in Technologies for Development : What is Essential ?* 4-6 juin 2014, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. Poster présenté : *Looking for vernacular paraseismic building workmanlike manner.*

42 Séminaire scientifique *Cultures Constructives Parasismiques : les Voies de la Recherche*, 27-28 mai 2013, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, France. Article présenté : Hofmann, M., 2013. Learning from effects of earthquakes on vernacular architecture. Seismic damages investigation as key activity for disaster risk reduction. In E. Samin, éd. *Disaster-resistant building cultures. The ways forward ?*. Grenoble : CRAterre-ENSAG, p. 114-117 (en cours de finalisation).

43 *CIAV 2013 Annual Conference from the International Committee of Vernacular Architecture of ICOMOS*, 16-20 octobre 2013, Ecole Supérieure d'Architecture Gallaecia, Vila Nova de Cerveira, Portugal. Article présenté : Hofmann, M. & Caimi, A., 2014. Learning from vernacular building practices. A starting point for risk mitigation. In M. Correia, G. Carlos, & S. Rocha, éd. *Vernacular heritage and earthen architecture. Contributions for sustainable development*. Londres : Taylor & Francis Group, p. 703-709.

44 Les principaux aspects qui ont été considérés dans l'examen du bâti et pendant les échanges avec les personnes rencontrées sont synthétisés dans les deux documents en annexe (cf. annexes 1 & 2).

3.3. PRÉSENTATION DU PLAN DE THÈSE

Le document de thèse s'articule en trois parties complémentées par une introduction et une conclusion.

L'introduction a présenté tout d'abord le domaine de l'étude et le cadre de référence, en dégagant les problématiques, les perspectives d'analyses et les questions de recherche. Ensuite, elle a formulé l'hypothèse de travail, énoncé les axes de recherche et exposé l'approche méthodologique.

Les trois parties principales de la thèse reflètent les perspectives d'analyse adoptées pour « décrypter » le lien entre l'architecture vernaculaire et le *facteur séisme*. Chacune d'entre elles se focalise sur une des thématiques définies par les axes de recherche approfondissant, respectivement, des aspects d'ordre culturel, structurel et cognitif. Dans chaque partie, la thématique traitée est d'abord explorée sur la base de la littérature existante en mettant en évidence les aspects représentatifs de l'interdépendance entre les cultures vernaculaires et le phénomène sismique. Ensuite, certains de ces aspects sont approfondis sur la base de l'investigation conduite sur le terrain en relation à un site spécifique (*Etude de cas*). La présentation des renseignements recueillis *in situ* s'effectue en se focalisant essentiellement sur des éléments qui ont émergés comme étant les plus significatifs par rapport aux sujets traités dans cette recherche, elle n'est donc pas exhaustive de tous les aspects analysés. En guise de conclusion, des remarques spécifiques, liées à ces éléments ainsi qu'aux thématiques abordées dans chaque partie théorique, sont formulées (*Synthèse*).

Ces trois parties se développent de manière autonome, tout en se rapportant à la réflexion d'ensemble, par le biais d'un chapitre introductif.

La première partie, *Déterminants culturels parasismiques*, se focalise, d'abord, sur l'impact des tremblements de terre sur les individus et les sociétés et, ensuite, sur les interprétations des signes corrélés à ces phénomènes au sein des cultures populaires. L'investigation porte également sur l'interdépendance entre les processus sociétaux et la résilience, en mettant l'accent sur les dynamiques augmentant ou réduisant la sensibilité sismique au sein des sociétés contemporaines. La deuxième section de cette partie se réfère à l'étude de cas développée dans la province de L'Aquila, en Italie. Elle présente les éléments identifiés comme des facteurs reliant la résilience des sociétés contemporaines à des stratégies de protection développées dans le passé. Ces éléments se rapportent aux aspects suivants : le rôle de la mémoire individuelle et collective ; le niveau de connaissance actuelle sur les particularités du bâti ancien améliorant sa résistance sismique ; la nature de l'interaction entre les représentations populaires et institutionnelles du risque.

Dans la deuxième partie, *Types de structures parasismiques*, la première section décrit les différents types de structures vernaculaires qui ont résisté au fil des siècles à de nombreux tremblements de terre. En particulier, une analyse typologique des systèmes porteurs verticaux en matériaux mixtes - pierre, terre et bois - est effectuée à partir d'exemples architecturaux présents dans les régions le long de la chaîne alpino-himalayenne. Afin de mieux cerner les facteurs régissant leur bonne performance, certaines des spécificités structurelles sont mises en relation avec des caractéristiques parasismiques distinctes. La deuxième section de cette partie se réfère à l'étude de cas conduite dans le territoire de la faille nord anatolienne, en Turquie. Elle présente les facteurs de corrélation entre la sismicité historique des sites et les propriétés de trois types de structures : en maçonnerie avec des éléments horizontaux en bois, en ossature bois avec remplissage, en maçonnerie avec des éléments en bois dans les sens horizontal et vertical. Pour ce faire, je procède à une description détaillée des particularités identifiées, en mettant en évidence celles qui sont susceptibles d'exercer une incidence marquée sur le comportement dynamique du bâti.

Dans la troisième partie, *Ressources cognitives parasismiques*, la pratique d'intégrer des éléments horizontaux en bois dans des éléments porteurs est approfondie, en mettant l'accent sur les avantages dans leur comportement statique. Par la suite, l'attention est focalisée sur les murs en maçonnerie possédant un type particulier d'insertions. Les rôles que celles-ci semblent assumer en cas d'événement sismique sont examinés et les paramètres susceptibles de déterminer leur efficacité sont évoqués.

Les enjeux techniques et culturels dans la reconnaissance institutionnelle de ce procédé constructif sont également discutés. La deuxième section de cette partie se réfère à l'étude de cas effectuée dans la région du lac d'Ohrid, en Macédoine et en Albanie. Elle présente les aspects variables dans la mise en œuvre de ce procédé qui ont été reconnus comme exerçant une influence marquée sur son efficacité sismique. Les raisons plausibles et les répercussions d'une telle hétérogénéité sont présentées en les rapportant aux modalités de diffusion des savoirs parmi les groupes de bâtisseurs vernaculaires, aux dégâts induits par les tremblements de terre ainsi qu'aux particularités structurelles permettant d'augmenter la résistance sismique du bâti.

En fin du document de thèse, un chapitre conclusif revient sur la réponse aux questions de recherche et sur la vérification de l'hypothèse de travail, en énonçant les potentialités et les limites d'un décodage du lien entre les architectures vernaculaires et le *facteur séisme* depuis des perspectives centrées sur les aspects d'ordre culturel, structurel et cognitif. Ceux-ci soulignent l'intérêt de consolider la synergie entre un processus d'introspection des cultures du risque « anciennes » et les stratégies de renforcement de la résilience des milieux humains et des environnements bâtis contemporains.

Partie I : Déterminants culturels parasismiques

INTRODUCTION DE LA PARTIE I

La résilience des environnements bâtis envers des tremblements de terre potentiellement destructeurs repose sur le niveau d'attention porté à ce risque (« sensibilité sismique ») lors de la conception et de la réalisation des ouvrages qui les composent. Elle est donc liée à des questions qui vont au-delà des celles d'ordre constructif : les décisions en matière de protection sont prises en relation aux valeurs intrinsèques des sociétés dans lesquelles elles sont appliquées. La résilience des milieux humains dépend également des attitudes et comportements répandus au sein d'une collectivité et pouvant, de fait, contribuer à un accroissement ou à une diminution de son niveau d'exposition aux phénomènes à caractère catastrophique. Dans la détermination de la résilience, les aspects culturels alimentant le rapport que l'Homme entretient avec le phénomène naturel des séismes représentent ainsi des facteurs clés.

Les interdépendances qui existent entre les interprétations des tremblements de terre et les modalités avec lesquelles les individus et les structures régissant la vie en société s'y rapportent, sont analysées dans cette première partie de la thèse ; ceci en mettant l'accent sur les déterminants culturels qui exercent une influence marquée sur les réponses apportées et qui, donc, agissent sur la vulnérabilité des milieux humains et des environnements bâtis. Cette analyse s'appuie sur des considérations au regard de moyens culturels de gestion du risque élaborés au fil des siècles, en les associant à des réflexions relatives à des dynamiques sociétales contemporaines, afin de comprendre les analogies et dissimilarités qui peuvent subsister dans la dimension comportementale des cultures du risque du passé et du présent.

L'intention de cette partie est de reconnaître les modalités selon lesquelles les cultures du risque élaborées au cours des siècles interagissent avec celles plus récentes dans la détermination de la résilience des sociétés actuelles, en vue de saisir le rôle effectif et/ou potentiel des stratégies vernaculaires dans la réduction de la vulnérabilité des milieux humains et des environnements bâtis contemporains.

ENTRE SIGNES ET SENSIBILITÉS

1. SIGNES SISMIQUES

1.1. IMPACTS DES SÉISMES SUR LE MILIEU HUMAIN

Les tremblements de terre sont des phénomènes naturels qui affectent un lieu physique mais surtout un milieu humain. Par ce fait, ils représentent des événements laissant des traces importantes tant au niveau de l'individu, au travers des expériences se rapportant aux fonctions psychophysiologiques, qu'au niveau de la société, au travers la combinaison de ces mêmes expériences partagées par un ensemble d'individus. Les séismes correspondent donc à des manifestations de la nature ayant un impact⁴⁵ à la petite échelle comme à la grande, de l'individu à la société (Guidoboni & Poirier 2004). Cet impact est durable, il commence avec le choc et dure des années, des décennies, voire des siècles.

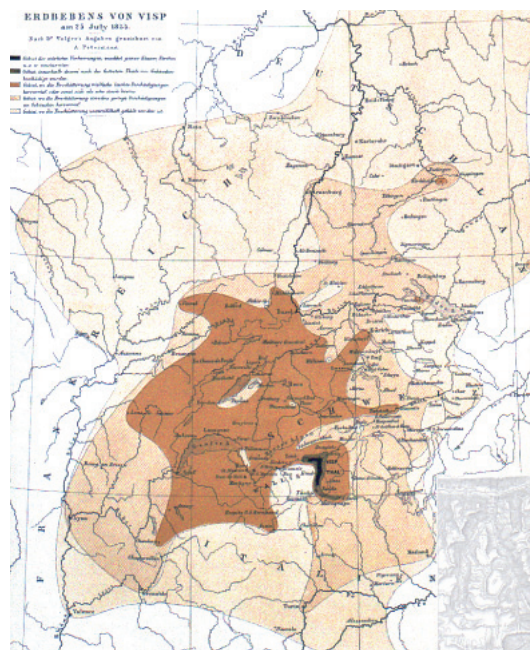


Fig.5 Niveaux de perception du séisme de Viège (Suisse) de 1855, à l'échelle territoriale : du blanc au brun foncé en ordre croissant (Crédit : Volger 1856 dans Gisler et al. 2008).

1.1.1. EFFETS SUR LES INDIVIDUS

Au niveau de l'individu, la destruction de sa propre maison coïncide avec la perte d'un élément possédant une importance anthropologique multiple (Ligi 2009) : lieu consacré à la famille, structure assurant la protection et représentant la sécurité, expression de l'identité individuelle, espace intime. L'effondrement d'un élément avec des connotations qui sont à l'origine même du « *sentiment d'être partie prenante d'un lieu et d'une histoire* » (Oxfam International 2005, p.13) en dit long sur les répercussions psychologiques qu'un séisme peut avoir, et cela même longtemps après un événement particulier (Ligi 2009). Quatre ans après le tremblement de terre de 2009 qui a frappé la province de L'Aquila, en Italie centrale, la vie apparaît désynchronisée : « *tout est divisé entre l'avant et l'après séisme* » (Matteucci 2013, trad. M.H.).

Les tremblements de terre n'épargnent guère l'individu dans sa dimension physiologique. Pendant la séquence sismique ayant affecté l'Italie centrale en 1997, un psychiatre témoigna qu'« *on n'est plus capable de faire autre chose qu'attendre le prochain ébranlement* » (Weidmann 2003, p.130). Ce type de réactions avait déjà été répertorié précédemment, dans un passé lointain. Ainsi, les survivants d'un violent séisme qui toucha en 1783 l'Italie du Sud ont souvent eu l'impression que l'environnement autour d'eux s'agitait constamment (Placanica 1985). D'ailleurs, certains chercheurs des milieux académiques du XVIII^e siècle étaient de l'avis que lorsqu'un tremblement de terre se produit, non seulement la terre mais également les esprits sont bouleversés par les secousses (Ibid.). À cette époque, un intellectuel de l'Académie de Naples avait écrit qu'« *une grande partie du désordre physique et moral est à attribuer à la même convulsion fatale de la Nature, qui modifie sensiblement la machine humaine ; et, en la modifiant, désoriente l'esprit tant dans ses idées que dans ses résolutions* » (Michele Sarconi dans Ibid., p.109, trad. M.H.).

⁴⁵ Le terme « impact » est ici entendu dans son sens figuré d'« influence en général » (Source : dictionnaire Larousse).

1.1.2. EFFETS SUR LES GROUPES D'INDIVIDUS

Ce genre de constats est à mettre en lien avec les particularités du phénomène sismique. À la différence d'autres types d'aléas naturels, ce dernier peut être considéré comme le seul qui provoque une expérience qui bouleverse brutalement deux aspects caractérisant constamment la vie quotidienne de l'Homme : le contact avec le sol et la stabilité de ce dernier. Lors d'un séisme, ceux-ci perdent leur connotation habituelle et sont remis en question. Il peut en découler l'« *impression que la réalité soit elle même provisoire* » (Placanica 1985, p.120, trad. M.H.) ; une sensation à l'origine d'un « *choc anthropologique* » (Ligi 2009) modifiant la manière de concevoir et de se rapporter à l'environnement naturel, mais également à d'autres enjeux tels que la justice sociale (Oliver-Smith 1996).

Le « *noyau moral et éthique du système de croyance* » d'un individu pouvant être influencé (Oliver-Smith 1996, p.308, trad. M.H.), les survivants d'un événement catastrophique apparaîtraient plus aptes à changer leur manière de vivre, comme si « *la fin du monde provisoire [...] autorisait à espérer en un monde nouveau* » (Placanica 1985, p.125, trad. M.H.). Selon certaines croyances traditionnelles chinoises, les tremblements de terre représenteraient le signe indiquant la fin du mandat céleste pour la dynastie au pouvoir et le présage de révolutions politiques (Ligi 2009). Alors qu'au XVIII^e siècle, le médecin parisien François Thierry avança même l'hypothèse des phénomènes sismiques comme l'un des facteurs à l'origine de l'accélération des changements sociaux et culturels de l'époque des Lumières (Stuber 2002). Il n'a pas été le seul à questionner le lien potentiel entre l'histoire de la nature, imprégnée d'événements extraordinaires, et l'histoire de l'Homme, marquée par des révolutions culturelles. D'après plusieurs recherches contemporaines en anthropologie, un événement catastrophique serait effectivement susceptible d'accélérer les changements déjà en cours au sein des sociétés avant l'impact (Oliver-Smith 1996).

1.1.3. EFFETS SUR LES SOCIÉTÉS

Au niveau de la société, la destruction de l'environnement bâti et la paralysie de l'économie d'un Etat ont historiquement conduit à des mouvements migratoires, des crises politiques, voire même au déclenchement d'invasions et de guerres, mais également à l'instauration de moments de trêve entre des communautés belligérantes (Fréchet et al. 2008).

De nos jours, les événements catastrophiques continuent à coïncider avec des moments importants dans les relations entre les gouvernements et la société civile (Oliver-Smith 1996). Suite au tremblement de terre et au raz-de-marée ayant frappé l'île indonésienne de Sumatra, une trêve fut signée entre le gouvernement national et les rebelles réclamant l'indépendance de la province d'Aceh, pour permettre aux organisations d'aide d'intervenir, quand jusqu'avant cette catastrophe l'accès aux étrangers et même aux indonésiens d'autres provinces était extrêmement difficile, voire interdit. En revanche, suite au tremblement de terre de 1999 dans la province de Kocaeli (en Turquie), l'incapacité du gouvernement à imposer le respect des normes de construction parasismique avant la catastrophe, ainsi que son inefficacité à gérer les secours, ont généré un mécontentement grandissant au sein de l'opinion publique (Cannon 2008; Weidmann 2003). Un mécontentement qui, associé à une grande inégalité sociale préexistante, s'est exprimé lors de successives élections politiques avec des changements importants au sein des structures au pouvoir.

Les événements sismiques ont aussi constitué des occasions pour renforcer ou assouplir des nouvelles relations de pouvoir politique au niveau local, régional et/ou national. Par exemple, le processus de reconstruction après le séisme de 1980 en Campanie et Basilicate (en Italie) a vu une montée en puissance du parti démocrate-chrétien (*Democrazia Cristiana*) au pouvoir déjà depuis une quarantaine d'année, alors que le séisme de 1970 au Pérou aurait stimulé des changements politiques importants ayant conféré une liberté d'action accrue aux indigènes (Oliver-Smith 1996).

Les tremblements de terre destructeurs, en plus de coïncider avec des facteurs pouvant induire des transformations sur le plan politique, ont également de très larges répercussions au niveau économique. Au cours du XX^e siècle, les pertes engendrées par les tremblements de terre en Europe ont été estimées

à environ 40 milliards d'euros⁴⁶. Dans ce genre de situations, une assistance financière, par le biais de prêts à d'autres pays, est souvent nécessaire pour la survie et la réhabilitation de la société affectée, ce qui peut conduire à une augmentation des dettes publiques (Coburn & Spence 1992). Néanmoins, selon les dynamiques internes à un pays, les événements sismiques peuvent également constituer un facteur de développement, grâce à l'afflux de ressources financières déclenchant un « boom », notamment dans le secteur de la construction, qui, en l'espace de quelques années, permet de stimuler la croissance économique d'une région, voire d'une nation entière (Latina 1989; Oliver-Smith 1996; Weidmann 2003).

Parallèlement, les catastrophes générées par des tremblements de terre, comme par d'autres aléas naturels, peuvent devenir des vecteurs d'innovation et des déclencheurs d'initiatives nouvelles dans la recherche scientifique. La naissance de la discipline aujourd'hui appelée volcanologie trouverait son origine dans l'éruption en 1631 du Vésuve (en Italie) : à cette occasion, la volonté de trouver des explications aurait conduit à la création de l'Observatoire vésuvien, la plus ancienne institution mondiale entièrement dédiée à l'étude des volcans (Miranda 2006). De manière analogue, les événements sismiques ayant affecté l'Europe au XVIII^e siècle, notamment le séisme de Lisbonne de 1755 et celui de 1783 en Italie du Sud, ont constitué des moments cruciaux dans le développement des branches scientifiques consacrées à l'étude de la Terre⁴⁷ (Placanica 1985; Pfister 2002b; Murteira 2004; Kozak & Cermák 2010). Le fait qu'un tremblement de terre implique des secousses se propageant dans le sous-sol est effectivement assumé seulement à partir de la deuxième partie du XVIII^e siècle ; et cela bien que le phénomène selon lequel une masse suspendue, tel qu'un pendule, oscille pendant un séisme est bien connu au moins depuis le XVII^e siècle (Fréchet et al. 2008).

Globalement, les phénomènes sismiques coïncident ainsi avec des moments clés dans l'évolution d'une société : leur impact représente souvent un agent de transformation sociale (Ligi 2009), notamment quand il assume des connotations catastrophiques (Barrué-Pastor & Barrué 1998). Dans ces cas, il est presque inévitable que « *le risque joue [...] le rôle de révélateur social des relations qu'une société entretient avec son milieu et qui en fait, à un certain niveau, un élément constitutif de la culture locale* » (Ibid., p.26). Entre les XVI^e et XIX^e siècles, les catastrophes induites par des aléas naturels ont effectivement représenté en Europe « *les moteurs de la modernisation dans les domaines du droit, de l'administration, de la gestion des risques et de la planification* »⁴⁸ (Christian Körner dans Pfister 2002a, p.17).

De fait, même des phénomènes naturels qui se produisent de manière ponctuelle peuvent devenir partie intégrante de l'histoire d'un lieu ; se manifestant plus ou moins cycliquement au sein d'un *continuum* historique d'une société, de tels événements comportent l'essor d'un long et lent processus d'apprentissage visant une cohabitation « pacifique » entre l'épanouissement culturel et la manifestation de la nature.

46 Source : site internet consacré au projet de recherche dénommé *New Integrated Knowledge based approaches to the protection of cultural heritage from Earthquake-induced Risk* et coordonné par l'Université des Etudes de Padoue (Italie), accessible à l'adresse www.niker.eu.

47 Parmi les chercheurs de cette période, on retrouve ceux qui sont aujourd'hui considérés comme les fondateurs de la sismologie, parmi lesquels le naturaliste et géologue suisse Elie Bertrand (1713-1797) et le naturaliste anglais John Michell (1724-1793) (Kozak & Cermák 2010).

48 Dans le cas de la Confédération Suisse - constitutionnellement un Etat fédéral depuis 1848 et aujourd'hui formé de 26 cantons - l'historique des crises provoquées par des aléas naturels et de leur gestion ont fait l'objet de plusieurs recherches démontrant que ces événements ont été utilisés par les organismes gouvernementaux « *pour en faire des plates-formes de mise en scène de l'idéal national* » (Pfister 2002b, p.231). De fait, l'émergence d'une identité nationale a été fortement influencée par des événements à caractère catastrophique ainsi que par la mobilisation de l'entraide qui les a suivi (Schmid 2002), déclenchant une poussée d'« *intégration nationale* » (Pfister 2002b). La cohésion nationale se renforça principalement pendant la période de 1830 à 1880, caractérisée par la succession de plusieurs graves catastrophes (Ibid.). Les discours officiels en rappelant et en propageant des valeurs communes ont « *stimulé des mouvements d'intégration psychosociologiques, par lesquels les individus à l'intérieur d'un espace d'intégration se reconnaissent comme membres d'un groupe fermé* », selon un réflexe qui se fonde sur le principe du « *rapprochement face au danger* » (Pfister 2002a, p.17). Il est intéressant de constater que les catastrophes contemporaines (comme le tsunami en Asie du Sud Est de 2004 ou les inondations dans le canton suisse du Valais en 2000) sont encore aujourd'hui un vecteur de renforcement du « *sentiment d'appartenance à la Suisse* » (Pfister 2002b). La catastrophe peut, de fait, devenir la « *matrice de solidarités et contribue comme telle à conforter les attachements identitaires ou du moins à faire croire à leur existence* » (Walter 2008, p.250).

1.2. INTERPRÉTATIONS DES SIGNES SISMIQUES

1.2.1. MOYENS CULTURELS

Afin de disposer des « *moyens culturels* » pour gérer les catastrophes naturelles, les sociétés - comprises en tant qu'ensemble d'individus, de groupes et d'institutions - ont depuis toujours et dans un grand nombre de cas attribué un « *sens* » aux événements à leur origine (Walter 2008). Les phénomènes identifiés comme recelant des risques assumeraient même un « *statut ontologique important dans l'interprétation de nous-mêmes et de nos mondes sociaux et matériels* » (Debra Lupton dans Ligi 2009, p.6, trad. M.H.). Traditionnellement, les séismes ont souvent fait l'objet d'interprétations se rapportant à des figures mythologiques. Ainsi, selon une légende d'Afrique orientale, l'origine des tremblements de terre serait à chercher dans le balancement de la planète Terre d'une corne à l'autre d'une vache, placée sur une pierre supportée par un énorme poisson (Weidmann 2003). Tandis que, d'après des croyances traditionnelles japonaises datant d'au moins quatre siècles, elle serait à chercher dans le mouvement d'un poisson-chat habitant les profondeurs terrestres, que seul un dieu nommé *Kashima* est capable de tranquilliser, en lui pressant une pierre sur la tête (fig.6; Ouwehand 1964; Ikeya 2004).



Fig.6 Représentations du poisson-chat, nommée *Namazu*, réalisées après le tremblement de terre de 1855 ayant affecté la ville japonaise d'Edo, devenue l'actuelle Tokyo : a) Victimes se vengeant contre le poisson, retenu responsable de la destruction ; b) Dieu *Kashima* immobilisant le poisson (Source : <http://pinktentacle.com>2011).

L'interprétation d'un événement tel qu'un tremblement de terre constitue la source première des « *représentations* » entendues en tant que « *schémas pertinents du réel à caractère collectif, social et culturel qui se veulent opératoires* » (Walter 2008, p.236). De fait, « *la gestion culturelle des risques repose sur une mémoire et des savoirs eux-mêmes pluriels, générateurs d'interprétations souvent plus subtiles qu'il n'y paraît* » (Ibid., p.62). Une multitude de valeurs, d'idées et de systèmes de croyances composent les fondements des moyens culturels de gestion des catastrophes car, en fait, « *ce que voit un sujet dépend à la fois de ce qu'il regarde et de ce que son expérience antérieure, visuelle et conceptuelle, lui a appris à voir* » (Kuhn 1970, p.160). À cet égard, la notion de culture, dans son sens anthropologique, explicite bien leur rôle au sein d'une société : « *chaque culture est concrétisée par des systèmes de signification sur le Monde [...] qui ont la fonction pratique, implicite ou explicite, de fournir - à chaque moment et dans le cours d'une vie entière - des protocoles qui, attribuant du sens à la réalité, orientent l'action individuelle et collective en déterminant des coutumes, des rites, des pratiques et des habitudes* » (Ciccozzi 2013, p.81, trad. M.H.).

1.2.2. À LA QUÊTE DES SIGNES CORRÉLÉS AU PHÉNOMÈNE SISMIQUE

Les interprétations des tremblements de terre sont inévitablement liées à la quête de signes qui leurs sont associés, permettant, de fait, de disposer des éléments pour essayer de déceler le phénomène naturel dans tous ses caractères. Ces signes composent une « forêt sémiotique » très vaste comprenant trois catégories, définies en fonction du sens qui leur est attribué (Placanica 1985) : certains sont perçus comme possédant un caractère soi-disant précurseur (signes *ante-rem*), d'autres sont considérés comme étant partie intégrante du phénomène même (signes *in-re*), tandis que d'autres encore constituent les marques et les traces laissées par le séisme dans l'environnement naturel et construit ainsi que dans le tissu sociétal (signes *post-rem*).

SIGNES POST-REM

Aujourd'hui comme dans le passé, les marques laissées sur le bâti par les événements sismiques constituent une source d'information particulièrement utile pour apprécier le niveau d'efficacité des procédés constructifs.

À titre d'exemple, on peut citer des observations relatives à la performance sismique de deux différents types de structures vernaculaires, l'une en maçonnerie de pierre et l'autre en madriers de bois, en relation à trois tremblements de terre qui ont eu lieu dans le canton du Valais (Suisse) en 1755 (Brigue, M 6.1), en 1855 (Viège, M 6.4) et en 1946 (Sierre, M 6.1). Lors de ces événements, les constructions en moellons ont généralement subi davantage de dégâts par rapport à celles en madriers ; toutefois, leur effondrement total a été rarement observé (Gisler et al. 2004; Gisler et al. 2008). Une destruction complète concerna essentiellement les maçonneries en pierres sèches, comme ce fut le cas en 1946 ; dans certains cas, ce constat fut d'ailleurs suivi par une volonté d'édifier les nouvelles constructions en bois (Marietan 1946). Ce type de structures ne fut, toutefois, pas complètement épargné par l'impact des séismes : bien que, lors du séisme de 1855, elles aient dans l'ensemble démontré une bonne performance, certaines d'entre elles se sont partiellement écroulées (Fritsche et al. 2006).



Fig.7 Architectures vernaculaires dans le canton du Valais : a) Lithographie illustrant les dégâts provoqués par le séisme de Viège de 1855, St. Niklaus (Crédit : Heusser 1856 dans Fritsche et al. 2006) ; b) Maquette d'un bâtiment d'habitation en madriers de bois, Weissenried (Crédit : EPFL) ; Effets du séisme de Sierre de 1946 sur des cabanes d'alpage en madriers (c, Crédit : Keystone) et en maçonnerie de pierre (d, Crédit : Schmid-Médiathèque Valais).

D'autre part, les marques sismiques sur les environnements bâtis peuvent manifester des traces laissées par un certain tremblement de terre dans le tissu social. Ainsi, par exemple, le niveau de dégâts relativement faible subi par les bâtiments de la ville de Brigue (Suisse) lors du séisme de Viège de 1855 (Ibid.) pourrait être considéré comme révélateur d'une attention accrue, envers le risque sismique, de la part des bâtisseurs et de la communauté locale. Une sensibilité qui, très probablement, se serait développée 100 ans auparavant, à la suite du violent tremblement de terre de 1755, en les amenant à renforcer les bâtiments endommagés et à prendre les précautions nécessaires lors de l'édification de nouvelles constructions.



Fig.8 Gravure de Viège, ville proche de Brigue, après le séisme de 1855 (Crédit : Volger 1856 dans Weidmann 2003).

En effet, les tentatives de réduction de la vulnérabilité de l'environnement bâti ont été entreprises, dans la plupart des cas, suite à des événements destructeurs : moment où la sensibilité envers le risque sismique atteint son niveau maximal. Cette sensibilité peut effectivement varier de manière importante en fonction de trois « situations sismiques » dans laquelle une société se trouve. Dans une situation ordinaire - le dernier tremblement de terre remontant à plusieurs années - elle correspond à un niveau faible, élevé dans une situation extraordinaire - moment immédiatement après le choc - et modéré dans une situation de réhabilitation - phase pendant laquelle se déroulent les activités de rétablissement.

Il ne s'agit donc pas d'un hasard si, de nos jours, les étapes historiques d'adaptation du cadre normatif institutionnel, en matière de tremblement de terre, coïncident souvent avec des événements sismiques particulièrement violents⁴⁹ (Woo 2011) ayant laissé des traces considérables tant dans l'environnement construit que dans le tissu social et, en particulier, dans l'esprit humain. Par ailleurs, les traces sismiques d'un tremblement de terre ont pu avoir des répercussions également sur les normes parasismiques de pays tiers. Par exemple, en Suisse, le processus d'élaboration des nouvelles normes entrées en vigueur en 2003 (SIA 261) s'est basé aussi sur l'analyse des dégâts sur le bâti lors du séisme qui a affecté la province de Kocaeli en Turquie, en 1999 (Lestuzzi 2003).

SIGNES ANTE-REM ET IN-RE

En ce qui concerne les signes considérés comme étant précurseurs (signes *ante-rem*) et ceux faisant partie intégrante du phénomène même (signe *in-re*), il est intéressant de constater que des interprétations de cultures différentes et de diverses époques peuvent présenter certaines analogies.

Les cas se référant aux poissons en sont un exemple représentatif.

Selon la tradition japonaise, la présence inhabituelle sur les plages de la mer de poissons vivant généralement près du fond (comme ces mêmes poissons chats qui d'après la mythologie seraient à l'origine des séismes) était à considérer comme un événement anticipant un séisme, d'où leur désignation traditionnelle de « messagers du palais du Dieu de la mer » (Ouwehand 1964). Le lien entre les poissons et les tremblements de terre fut également établi lorsque des milliers de petits poissons, appartenant à une espèce visible surtout dans les profondeurs marines, apparurent avec les vagues d'un raz-de-marée déclenché par des secousses sismiques dans le détroit de Messine en Italie du Sud en 1783 (Placanica 1985). D'après des suppositions effectuées récemment par des chercheurs, l'apparition de certaines espèces de poissons serait à mettre en relation avec leur grande sensibilité aux signaux électriques : leur déplacement vers la surface pourrait résulter d'une perturbation du champ électrique induite par les mouvements des failles tectoniques qui précèdent un grand séisme (Suyehiro 1934; Bhargava et al. 2009).

⁴⁹ Ce qui a été le cas dans plusieurs pays, notamment en Turquie, au Japon, au Mexique, aux Etats-Unis, au Chili, en Nouvelle-Zélande, en Inde et en Argentine.

Non seulement le comportement des poissons mais aussi celui d'autres animaux a fait l'objet de réflexions sur d'éventuels indices susceptibles de précéder les tremblements de terre (Ibid.). Par exemple, des chercheurs étudiant des crapauds près de la ville de L'Aquila (Italie) ont constaté que 5 jours avant le tremblement de terre du 6 avril 2009 et jusqu'à quelques jours après, ils avaient un comportement très différent de l'ordinaire (Grant & Halliday 2010).

Parallèlement, le débat sur les phénomènes pouvant avoir un caractère précurseur ne concerne pas exclusivement les comportements anormaux visibles au sein du monde animal : il inclue en effet également des phénomènes tels que les variations de la déformation des roches ou des niveaux des eaux souterraines. Les jours précédents ce même séisme à L'Aquila, un technicien nucléaire, en observant des anomalies dans les niveaux du gaz radon dans les eaux souterraines, annonça un tremblement de terre, qui n'a pourtant pas eu lieu à l'endroit et au moment qu'il avait prévu (Alexander 2010). À propos de ce genre de corrélations formulées dans les cultures populaires comme par des scientifiques, c'est souvent le nombre réduit d'échantillons examinés qui est évoqué pour les délégitimer, considéré comme insuffisant pour pouvoir établir des relations fiables entre les causes et les effets (Woo 2011).

Les questionnements concernant les phénomènes soi-disant précurseurs se rapportent également à l'activité sismique dans un site donné : peut-elle être considérée comme source qui permette d'extrapoler des renseignements fiables sur la suite de l'activité sismique ? En principe, l'intensification de l'activité sismique ainsi que l'arrêt instantané d'une série de faibles secousses peuvent être considérés comme des signes indiquant l'augmentation du risque d'occurrence d'un séisme violent (Weidmann 2003). Cependant, les connaissances actuelles en la matière ne sont pas suffisantes pour établir avec certitude une corrélation directe entre ces facteurs et, jusqu'à présent, aucun phénomène est encore universellement reconnu par les milieux scientifiques comme étant un indice précurseur fiable⁵⁰.

GESTION DES « BONS » SIGNES SISMQUES

La prise en considération d'un ensemble de signes de nature diverse a souvent permis l'adoption de mesures de précaution qui se sont révélées très efficaces.

Cela fut le cas à l'occasion du tremblement de terre (M 7.3) de 1975 ayant affecté la ville de Haicheng dans le Nord Est de la Chine. Pendant les mois qui l'ont précédé, le bureau sismologique de l'Etat a constaté un changement à grande échelle des comportements des animaux ainsi qu'une modification du niveau de la nappe phréatique. Ces deux anomalies associées à l'augmentation de l'activité sismique ont amené les autorités locales à ordonner une évacuation de masse. Les consignes indiquant à la population de quitter leurs habitations ont ainsi permis d'épargner la vie de milliers de personnes (Wang et al. 2006; Bhargava et al. 2009). Toutefois, cette manière de gérer le risque sismique coïncide avec une approche relativement isolée : seulement une année après, un puissant tremblement de terre (M 8.2) frappa la région chinoise de Tangshan en provoquant le décès d'environ 240'000 personnes.

Au sein des sociétés traditionnelles, l'importance de combiner des signes différents dans la gestion des catastrophes est parfois transmise par le biais de contes. D'après un récit indonésien, la combinaison de deux signes distincts - des secousses sismiques suivies par le retrait de la mer - indiqueraient la haute probabilité d'occurrence d'un raz-de-marée et donc l'urgence de se réfugier sur les collines (McAdoo et al. 2006). Lors du tsunami de 2004, la lecture de ce double signe a permis à de nombreux habitants de se sauver. Des réactions semblables ont été constatées également dans d'autres régions asiatiques, comme au Myanmar ou en Thaïlande (Rungmanee & Cruz 2005).

Une lecture des « bons » signes sismiques épaulée par un « système bien organisé de surveillance des éléments précurseurs » (Cannon 1994, p.25, trad. M.H.) peut permettre, dans certaines circonstances, de répondre aux phénomènes sismiques non seulement par le biais de mesures constructives mais également avec des moyens culturels, notamment des attitudes et des comportements précautionneux. D'ailleurs, cet aspect n'est pas anodin car, en fin de compte, les tremblements de terre doivent, d'abord,

⁵⁰ Malgré le nombre de recherches effectuées depuis des décennies par les sismologues, la prévision à court terme avec « indication temporelle et spatiale » de la secousse « attendue » semble être un objectif très difficile à atteindre et constitue un sujet particulièrement controversé (Alexander 2010).

être maîtrisés par l'« *esprit humain* » : seulement ainsi des mesures techniques de protection peuvent être élaborées et, surtout, appliquées de manière diffuse avec le résultat espéré (Teiji Itoh dans Tobriner 1998).

1.2.3. CHANGEMENTS DANS LA RELATION DES SCIENTIFIQUES AVEC LE PHÉNOMÈNE SISMIQUE AU XVIII^E SIÈCLE

Dans l'interprétation des tremblements de terre et dans les réactions entreprises à leur égard, une autre catégorie de signes parmi ceux distingués auparavant (signes sismiques *ante-rem*, *in-re* et *post-rem*) a historiquement joué un rôle particulièrement significatif : ceux se rapportant à la dimension du sacré.

En Europe, les traditions religieuses chrétiennes ont toujours attribué beaucoup d'importance aux interprétations des catastrophes afin de « *raffermir un certain ordre social et moral* » et pour « *rappeler les valeurs essentielles du destin fragile et éphémère de l'humanité* » (Walter 2008, p.252). L'interprétation religieuse dominante au Moyen Age s'appuyait sur une théorie dite « de la rétribution », qui concevait les catastrophes en tant que punitions divines en réponse à des comportements individuels ou collectifs (Fässler 2002; Chester & Duncan 2009). Le rôle de la Providence était alors promu pour contraster une « *conception animiste du monde* », où le bonheur n'était pas mis en rapport avec le mérite personnel, ainsi que pour circonscrire l'ancienne conception populaire d'« *une nature marquée par la magie* » selon laquelle les catastrophes étaient des signes de malheur (Stuber 2002; Walter 2008). Avec cette nouvelle interprétation, la construction de l'« *enchaînement causal pêché-punition* » représentait un plaidoyer efficace contre l'« *éloignement de Dieu* » (Ibid.) et, simultanément, un moyen pour accroître l'attachement de la population aux saints protecteurs.

Au cours du XVIII^e siècle, un changement important s'est produit avec l'émergence de la théorie physico-théologique considérant le tremblement de terre, certes, comme quelque chose dont le « *caractère spectaculaire est toujours à interpréter comme action divine* » mais aussi comme « *quelque chose d'utile et de nécessaire au fonctionnement de l'univers* » (Ibid., p.13). Même si Dieu continuait à être considéré comme le Maître d'un « *système coordonné de nature mécanique* » (Placanica 1985, trad. M.H.), avec cette théorie les séismes destructeurs et les catastrophes en général ne représentaient plus les signes de sa colère. La « *mise en doute du dispositif de corrélation symbolique du christianisme [...] entre le mal physique et le mal moral coïncide avec le point de départ de la philosophie morale moderne, dont le mouvement des Lumières représente la forme la plus achevée* » (Ligi 2009, p.118, trad. M.H.).

Pour saisir l'importance qu'une telle mutation d'interprétation a pu assumer, on peut évoquer une insinuation du philosophe des sciences Thomas S. Kuhn (1922-1996) indiquant que, bien que le monde ne se transforme pas de manière tangible suite à un changement de paradigme, « *l'homme de science travaille désormais dans un monde différent* »⁵¹ (Kuhn 1970, p.170). De fait, les inventions des milieux scientifiques européens de cette époque sont le témoignage d'une nouvelle manière, fondée sur une conception naturaliste et mécanique, de se rapporter aux phénomènes naturels. L'invention du paratonnerre est particulièrement représentative de cette vision, dont le but coïncide avec la maîtrise par les sciences et les techniques des forces naturelles jusqu'à là perçues comme incontrôlables (Walter 2008).

Les traits constitutifs du changement en cours à cette époque quant au lien entre l'Homme et la nature, peuvent être aperçus également dans les textes circulant dans les milieux intellectuels, en référence au tremblement de terre de 1755 à Lisbonne (Portugal)⁵², notamment la correspondance entre Voltaire et Rousseau (Murteira 2004).

51 Les paradigmes sont considérés par Kuhn comme des « *découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions* » (Kuhn 1970, p.11).

52 Le tremblement de terre qui a eu lieu en 1755 à Lisbonne fut considéré par les adeptes de la théorie de la rétribution comme un cas représentatif de leurs idées car, à cette époque, cette ville portugaise était fréquentée par de nombreux libres penseurs et athées (Murteira 2004).

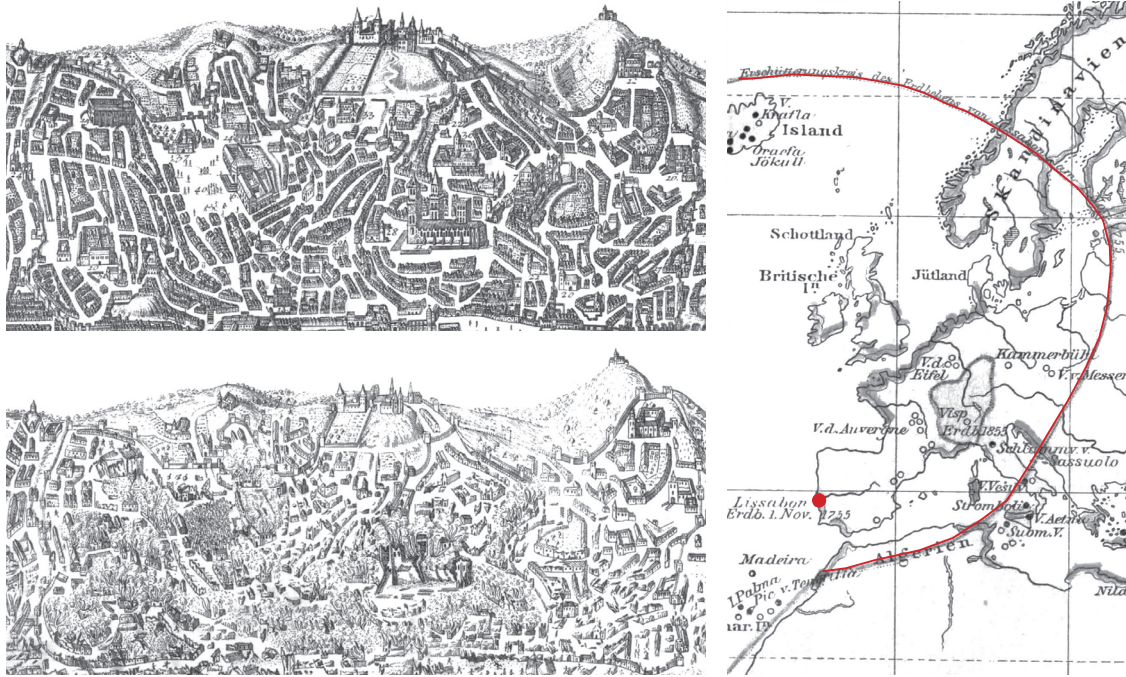


Fig.9 Séisme de Lisbonne de 1755 ; Représentations de la ville avant (a) et après (b) l'impact (Source : Stuber 2002) ; (c) Etendue du territoire où les secousses ont été ressenties, pratiquement dans toute l'Europe occidentale (Crédit : Berghaus 1888 dans Gisler et al. 2008).

En 1747, Voltaire écrit qu'« *il n'y a point de hasard ; tout est épreuve ; ou punition, ou récompense, ou prévoyance* »⁵³, mais, après ce séisme, il se demanda comment cet événement pouvait être permis par un Dieu bienfaisant. Dans une lettre⁵⁴ datée de 1756, Jean-Jacques Rousseau lui répliqua en mettant en évidence l'importance du type d'« *interactions qui enserrant nature et société* », tout en soulignant l'influence que le « *comportement irresponsable des sociétés humaines* » peut avoir sur des catastrophes induites par des phénomènes naturels. Les équilibres entre société et nature n'étaient de fait plus définis uniquement par des entités surnaturelles mais également par l'agissement de l'homme, dont l'architecture représente une des ses principales expressions : « *la nature n'avait point rassemblé là vingt mille maisons de six à sept étages ; [...] si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également, et plus légèrement logés, le dégât eût été beaucoup moindre, et peut-être nul* ».

De manière semblable, Kant aussi, une année après le séisme de Lisbonne, évoqua l'importance de la conception architecturale sur leur résistance en cas de tremblements de terre, en mentionnant la hauteur limitée des constructions des régions sismiques du Pérou et du Chili (Reinhardt & Oldroyd 1983). Parmi les intellectuels de la deuxième moitié du XVIII^e siècle, il se développa ainsi une approche d'analyse des aléas naturels basée sur le concept de risque de catastrophe, dont les composantes principales coïncident avec les notions de probabilité (possibilités qu'un tel événement se produise) et de causalité (raisons à son origine) (Ligi 2009).

Le « *renouveau global* »⁵⁵ conséquent à une modification de représentation de la nature et de la société (Picon 1996) peut être mis en lien avec trois changements spécifiques encourus dans la relation des scientifiques avec le phénomène sismique.

Premièrement, l'intérêt des scientifiques s'étendit au-delà des causes des tremblements de terre et commença à se concentrer également sur les conséquences dans l'environnement naturel et bâti (Di Pasquale 1996).

⁵³ Extrait du texte intitulé *Zadig ou la destinée. Histoire orientale.*

⁵⁴ Lettre intitulée *Apologiste de la religion chrétienne.*

⁵⁵ D'après Antoine Picon, les changements techniques ayant eu lieu le long des siècles ne sont pas uniquement le résultat de petites adaptations successives, mais ils découleraient également de « *renouveaux globaux* » relatifs à des facteurs d'ordre culturel (Picon 1996).

Le séisme de Lisbonne avait fortement stimulé dans toute l'Europe les réflexions au regard du phénomène sismique⁵⁶, ainsi, 28 ans après, au moment du tremblement de terre de 1783 en Italie du Sud, plusieurs étaient les scientifiques qui se sont rendus sur place pour en étudier les conséquences (Fabrizio 1933; Murteira 2004). Cet événement sismique de 1783 se caractérise encore aujourd'hui pour être le tremblement de terre le plus illustré parmi ceux ayant eu lieu dans la période avant l'invention de la photographie (fig.10; Kozak & Cermák 2010).

Par ailleurs, à cette occasion, les premières analyses visant à mesurer l'intensité des secousses sismiques sur la base de leurs effets se développèrent (Fréchet et al. 2008) : la première échelle d'intensité macrosismique fut élaborée pour pouvoir les quantifier et qualifier et, pour la première fois, des symboles furent dessinés sur des cartes géographiques pour localiser les dégâts et indiquer leur gravité⁵⁷.



Fig.10 Peintures illustrant les scientifiques s'étant rendus dans les sites concernés par le séisme de 1783 en Italie du Sud pour analyser les conséquences dans l'environnement naturel (a) et construit (b, Source : Placanica, 1985). Ces peintures font partie de l'ouvrage intitulé *Istoria de' fenomeni del tremoto*, publié en 1784 par la *Reale Accademia delle Scienze e Belle Lettere di Napoli*. Cet ouvrage regroupe un grand nombre de peintures réalisées afin de reproduire au mieux les effets du séisme ; il explicite la volonté de saisir les caractères propres à un tremblement de terre.

56 Trois aspects spécifiques ont contribué à faire devenir le séisme de Lisbonne un événement de dimension européenne. Premièrement, les effets ont été ressentis bien au-delà de la ville de Lisbonne, quasiment dans toute l'Europe, et même dans une région faiblement sismique comme celle autour du lac Léman en Suisse, dont le niveau de l'eau monta brusquement à trois reprises (Walter 2008). Deuxièmement, après cet événement, d'autres secousses se produisirent dans plusieurs pays : en Suisse, cinq séismes ayant eu lieu entre la fin de l'année 1755 et le début de 1756 ont même provoqué des importants dégâts sur le bâti (Stuber 2002). Troisièmement, le système de diffusion d'informations était beaucoup plus efficace par rapport aux périodes antécédentes, ce qui a favorisé une médiatisation plus importante de ces événements (Ibid.).

57 Bien que des analyses macrosismiques, permettant de classer l'intensité des secousses à partir de l'observation de leurs effets, furent effectivement conduites dans cette deuxième moitié du XVIII^e siècle, c'est principalement à partir du dernier quart du XIX^e siècle qu'elles ont commencé à être régulièrement effectuées après chaque événement sismique important. Le développement des procédures d'analyse découlent d'améliorations apportées au fil du temps par les scientifiques, sur la base de multiples réflexions relatives aux modalités pour évaluer le niveau d'endommagement ainsi que sa distribution dans un territoire. Celles qui ont été apportées par le géologue Georg Heinrich Otto Volger (1822-1897) et le géographe August Petermann (1822-1878) suite au tremblement de terre de Viège (Suisse) de 1855 ont représenté une contribution majeure (Gisler et al. 2008). Le système de classification adopté à cette occasion constitue, de fait, une des premières échelles macrosismiques considérant simultanément la perception des personnes, le comportement des objets et les dégâts sur le bâti : paramètres qui sont encore employés de nos jours dans l'échelle d'intensité EMS-98 (élaborée en 1998), la plus utilisée dans les pays européens.

Suite à ces deux séismes ayant caractérisé la deuxième moitié du XVIII^e siècle, les traces sismiques (signes *post-rem*) devinrent aux yeux des scientifiques des sources d'information pour mieux appréhender et gérer le phénomène sismique. Pour le géographe français Nicolas Desmarest (1725-1815), il ne s'agissait plus d'expliquer uniquement les causes, mais plutôt de saisir le mécanisme de transmission des ondes sismiques par l'examen de leurs effets. Simultanément, le philosophe et mathématicien Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) plaidait pour une science des effets permettant de prévoir les mouvements des objets sur la base de leurs conditions initiales.

Un autre changement dans la manière de se rapporter au phénomène sismique coïncida avec l'intérêt accru porté au comportement dynamique du bâti (Di Pasquale 1996). Les réactions que les secousses sismiques induisaient sur les constructions commencèrent, en effet, à être analysées en se référant aux lois de la dynamique (D'Antonio 2013), comme en témoigne la publication, une année seulement après le séisme de Lisbonne, d'un des premiers ouvrages scientifiques consacrés au lien entre le bâti et le phénomène sismique, le traité d'Eusebio Sguario intitulé *Specimen physico geometricum de terraemotu ad architecturae utilitatem concinnatum* (1756).

Une attention toute particulière se développa, en outre, à l'égard d'éventuels moyens constructifs pour soustraire les bâtiments à l'effet des séismes (Fabrizio 1933). Sur la base des observations des dégâts, des lignes directrices commencèrent à être formulées pour appuyer une bonne conception architecturale⁵⁸.

La prise de conscience d'une réelle possibilité d'augmenter la résistance du bâti par la mise en place de mesures techniques particulières a représenté, dans les milieux scientifiques, un moment crucial dans la relation entre l'art de bâtir et le *facteur séisme* (Di Pasquale 1996). Aspect qui commence à être également formellement intégré dans les publications spécialisées. Un des premiers traités d'architecture faisant référence à des pratiques parasismiques correspond à l'ouvrage *Principi di Architettura civile* de Francesco Milizia (1725-1798) publié 30 ans après le séisme de Lisbonne⁵⁹ (D'Antonio 2013). À ce propos, il faut également noter que bien que certains textes anciens fassent référence à des mesures techniques permettant d'améliorer la résistance du bâti contre les tremblements de terre⁶⁰, elles n'avaient globalement pas fait l'objet d'analyses approfondies dans les traités d'architecture des siècles précédents à l'époque des Lumières (Rovero & Tonietti 2012).

DES INTERPRÉTATIONS AUX RÉACTIONS

Les différentes interprétations des signes associés au phénomène sismique ont fait surgir, au fil des siècles, nombreuses manières avec lesquelles les sociétés s'y sont rapportées. Elles ont de fait joué un rôle central dans la détermination de la vulnérabilité sismique des milieux humains et des environnements bâtis ; notamment par le biais des agissements des institutions qui structurent la vie en communauté.

L'impact des institutions publiques dans la détermination de la vulnérabilité du bâti est introduite, dans le chapitre suivant, en mentionnant des cas historiques d'application de mesures préventives ainsi qu'en évoquant la liaison entre le cadre normatif, les cultures constructives et la vulnérabilité des environnements bâti existants. L'importance des processus sociétaux en relation au risque sismique est également approfondie en mettant l'accent sur les facteurs susceptibles d'augmenter la vulnérabilité sociale.

58 Par exemple, le constat que les constructions ayant présenté le plus de dégâts coïncidaient avec celles se trouvant en position orthogonale par rapport aux secousses sismiques, a fait émerger l'idée selon laquelle il fallait disposer les nouveaux bâtiments de manière qu'aucune façade ne soit perpendiculaire à la direction principale du tremblement de terre.

59 Il faut toutefois préciser que l'ouvrage qui illustre pour la première fois un projet de construction parasismique correspond à celui de l'architecte italien Pirro Ligorio (1513-1583) intitulé *Libro di Diversi Terremoti*, rédigé en 1571 mais resté inédit jusqu'en 2005 (D'Antonio 2013).

60 Un des premiers ouvrages qui témoigne d'un principe parasismique est le *Naturalis Historia* de Plinie l'Ancien, datant du début de notre ère (Di Pasquale 1996). Il mentionne le cas du temple grecque de Diane à Ephèse où une double couche de morceaux de charbon et de toisons de laine étaient intégrée, au niveau des fondations, pour réduire l'effet des secousses sismiques sur le bâti.

2. INTERDÉPENDANCE ENTRE SENSIBILITÉ SISMIQUE ET VULNÉRABILITÉ

2.1. INSTITUTIONS PUBLIQUES ET VULNÉRABILITÉ DU BÂTI

Les institutions structurant les sociétés ont toujours joué un rôle crucial dans la résolution des problèmes tels que ceux liés au risque sismique, et ceci depuis l'époque ancienne (Ligi 2009). Un exemple particulièrement représentatif de l'importance qui pouvait être attribuée au phénomène sismique au sein des communautés anciennes est la règle instaurée dans la société babylonienne (II^e millénaire avant notre ère) qui envisageait une condamnation à la peine capitale pour les bâtisseurs lors que l'effondrement de leurs ouvrages provoquait des décès parmi la population (Woo 2011).

2.1.1. MESURES HISTORIQUES POST-SÉISME DE PROTECTION DU BÂTI

Le premier cas connu de promotion institutionnelle de dispositifs constructifs améliorant le comportement du bâti se rapporte au séisme de 1716 en Algérie (Fabrizio 1933; Abdessemed Foufa & Benouar 2010). Encouragée par le Gouverneur d'Alger (le Dey Aly Chaouch), leur mise en œuvre a concerné, en particulier, les travaux de renforcement de nombreux bâtiments de l'ancienne citadelle de la ville d'Alger, parmi lesquels le Palais du Dey datant du XVI^e siècle. Trois siècles plus tard, lors du tremblement de terre d'Alger de 2003 (M 6.8), leur efficacité a été à nouveau prouvée, tant par le bon comportement de ce palais que par le constat que les structures qui n'ont pas été concernées par ces travaux ont subi un niveau particulièrement élevé de dommages (Abdessemed Foufa & Benouar 2008).

Cependant, la première fois qu'un ensemble de règles parasismiques fut rendu obligatoire se rapporte à la reconstruction de la ville de Lisbonne, après le séisme de 1755 (Cardoso et al. 2004; Ece Ferah 2009). À cette occasion, plusieurs mesures de prévention ont été conçues et adoptées à l'échelle du bâtiment comme à l'échelle urbaine, suivant la volonté du Marquis de Pombal⁶¹, et cela à partir d'une analyse minutieuse des dégâts. Bien que ces mesures n'aient pas été traduites dans un règlement écrit, elles devaient être scrupuleusement suivies par les constructeurs, faute de quoi la démolition pouvait être exigée par les autorités en charge de la reconstruction. Un système très organisé de surveillance sur les chantiers fut même mis en place à cet effet.

C'est toutefois seulement après le tremblement de terre de 1783 en Italie du Sud que le premier règlement de construction parasismique a été élaboré⁶² (Tobriner 1997). Sous la volonté du gouvernement des Bourbons, les scientifiques, les architectes ainsi que les administrateurs publics essayèrent d'apporter une réponse au problème sismique avec une hardiesse extraordinaire pour cette époque.



Fig.11 Peinture illustrant le déroulement des travaux de reconstruction de la ville de Polistena (Italie), suite au séisme de 1783, sous la supervision d'un responsable (Source : Placanica 1985).

⁶¹ Le premier ministre du roi en charge de la reconstruction.

⁶² Ce règlement (appelé *Istruzioni reali*) a été promulgué en 1784.

Bien que les systèmes de construction promus dans ces deux cas de reconstruction, au cours du XVIII^e siècle, étaient très similaires (en ossature bois), le lien entre les deux expériences n'est pas connu. Certains chercheurs soutiennent que le gouvernement des Bourbons aurait inévitablement bénéficié de l'expérience portugaise (Bianco et al. 2007), tandis que d'autres supposent le contraire, du fait que les documents relatifs à la reconstruction des villes italiennes n'en font jamais mention (Tobriner 1997). En tout cas, ces deux exemples témoignent d'une volonté institutionnelle à faire face au problème sismique par le biais d'une reconstruction contrôlée s'appuyant sur un cadre normatif.

Même en relation à d'autres aléas naturels, nombreuses sont les réactions comparables ayant eu lieu à cette époque en Europe. Par exemple, suite à la destruction de la ville suisse de La Chaux-de-Fonds, en raison d'un incendie en 1794, les institutions locales décidèrent de redéfinir le plan urbanistique sur la base d'une parcellisation en forme d'échiquier, afin de réduire le risque de diffusion du feu (Fässler 2002). Ces différents cas sont particulièrement représentatifs d'une volonté institutionnelle de diminuer la vulnérabilité des environnements bâtis par le biais d'une reconstruction qui prenne en compte également la structure urbaine. À Lisbonne, certains des districts affectés par le séisme furent reconstruits en îlots, avec une largeur des rues suffisante pour éviter le risque d'effet domino pouvant être généré par l'effondrement d'un bâtiment (Cardoso et al. 2004; Ece Ferah 2009). Cette démarche avait d'ailleurs déjà été adoptée auparavant. Le plan élaboré pour la ville italienne de Catane, suite au séisme du Val di Noto de 1693, dans le Sud Est de la Sicile, se caractérise par une structure urbaine très régulière (fig.12c), en très fort contraste avec la précédente implantation d'époque médiévale, et par une largeur des rues augmentée afin de réduire les risques pour les personnes se trouvant dans les espaces publics, en cas de renversement des façades (Latina 1989; Dufour & Raymond 1992; D'Antonio 2013).



Fig.12 Tremblement de terre du Val di Noto (Italie) de 1693 : Représentations des effets sismiques sur les habitants (a, Source : Dufour et Raymond 1992) et sur l'environnement bâti de la ville de Catane (b, Source : Kozák et Cermák 2010) ; c) Plan de Catane reconstruite après le séisme (Source : Latina 1989).

Les résultats des tentatives institutionnelles historiques de réduction de la vulnérabilité de l'environnement bâti au travers de la promulgation de règles, écrites ou orales, développées après des tremblements de terre majeurs ont été, de manière générale, très labiles (Fabrizio 1933). Dans le cas portugais, l'application des prescriptions émises après le séisme de 1755 s'est prolongée pour une période relativement longue et elle a été abandonnée seulement vers la fin du XIX^e siècle. Toutefois, les cas où des institutions ont réussi à faire respecter de manière systématique les mesures promues en matière

de construction parasismique sur le très long terme sont relativement rares ; ceci notamment en raison d'un développement urbain souvent trop rapide à contrôler (Coburn & Spence 1992). Dans le cas du tremblement de terre de 1783 en Italie du Sud, la majorité des villes furent reconstruites sans vraiment suivre les plans directeurs dessinés par les responsables en charge de la réhabilitation, et les normes promulguées furent respectées seulement pendant les premières années. En effet, leur prise en considération s'affaiblit progressivement jusqu'à leur abrogation partielle en 1853, décision qui s'est d'ailleurs révélée être fatale lors d'événements sismiques postérieurs⁶³ (Fabrizio 1933).

2.1.2. FLUCTUATION DES SENSIBILITÉS ENVERS LE FACTEUR SÉISME

Dans une société, la perception existante peut sous-estimer le niveau de risque effectif. Le cadre mental collectif se caractérise alors par un faible degré de sensibilité envers le phénomène sismique qui n'inciterait pas la mise en œuvre de mesures de protection. En revanche, dans d'autres cas, cette perception du risque peut être conforme au danger effectif ; la prédominance d'un sentiment de prévoyance stimulerait ainsi des agissements visant à réduire la vulnérabilité des milieux (Ligi 2009). Ce sentiment ne s'exprime pas uniquement par le biais de mesures techniques, mais également avec des mesures de type comportemental.

Cela a été le cas dans certaines régions de l'Italie (notamment dans le Centre et le Sud) où, entre les XVIII^e et XIX^e siècles, la difficulté économique de construire des habitations résistantes aux tremblements de terre, amena les propriétaires à réaliser une pièce interne où les habitants pouvaient se réfugier lors de secousses sismiques (Ruggieri 2005). Bâtie avec des procédés constructifs beaucoup plus résistants de ceux ordinairement employés pour les autres parties de la maison (Barucci 1990), cette « chambre de sécurité » (fig.13) constituait ainsi un refuge pendant les longues et fréquentes séquences sismiques auxquelles l'Italie a été souvent assujettie.

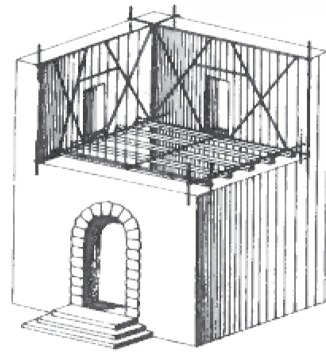


Fig.13 Chambre de sécurité développée aux Calabres (Italie) dont les murs en maçonnerie de pierre sont renforcés avec des éléments métalliques (Crédit : Pessò 1876 dans Barucci 1990).

Dans l'évolution d'une culture constructive, comme dans l'histoire d'une société, le niveau de sensibilité envers les tremblements de terre peut fluctuer au fil du temps, en donnant lieu à des périodes d'hypermnésie ou, au contraire, d'amnésie collective à l'égard du risque que ces phénomènes présentent (Borda d'Água & Jacob 2007). Parmi les multiples raisons de cette fluctuation, on peut mentionner le changement de priorité dans les paramètres considérés dans l'art de bâtir, pouvant se manifester en raison de l'impact d'autres types d'événements extraordinaires. C'est dans un tel changement qu'il faut chercher, par exemple, la raison d'une évolution de l'environnement construit dans la ville d'Istanbul (Turquie) au cours des siècles. La résistance sismique des constructions à ossature bois était localement bien connue déjà à partir du XVI^e siècle⁶⁴. Toutefois, des incendies en début du XIX^e siècle ont amené les autorités à proscrire ce type de structures (sauf si le bois était protégé par des parements coupe-feu en briques cuites) et à promouvoir celles en maçonnerie (Doğangün et al. 2006). Aujourd'hui, ces paramètres se sont à nouveau renversés : la réglementation en matière de construction accepte l'utilisation du bois en raison de la bonne performance de ces structures lors de séismes récents (XX^e siècle) et de la gravité des dégâts subis par les bâtiments en maçonnerie (Diskaya 2007).

D'ailleurs, des sensibilités sismiques variées peuvent exister également au sein d'une même société, en raison de la grande diversité qui subsiste parmi ses membres ou groupes sociaux dans la perception de la probabilité qu'un événement donné se produise et/ou dans la perception de la portée que ce même événement peut avoir (Ligi 2009). Ainsi certains individus ou groupes peuvent avoir tendance à relativiser la gravité d'un danger (groupes dits des « minimalistes ») tandis que d'autres assumeraient plutôt des comportements précautionneux, voire alarmants (groupes dits des « maximalistes ») (Ibid.).

⁶³ Notamment ceux de 1894, de 1905 et de 1908.

⁶⁴ Leur bonne performance avait effectivement été observée pendant le séisme de 1509 (Shah 2006).

2.2. CULTURE CONSTRUCTIVE, CADRE NORMATIF ET VULNÉRABILITÉ DU BÂTI

Influençant de manière directe les choix des personnes quant au type des travaux qu'ils décident d'entreprendre, les projets institutionnels relatifs au bâti, tels que la promulgation et/ou l'abrogation de normes, peuvent avoir un fort impact sur la propagation des procédés constructifs, en amplifiant ou en limitant leur utilisation (Coburn & Spence 1992). L'exemple de l'île grecque de Leucade est représentatif de l'influence que des normes relatives à la réhabilitation et la protection du bâti existant peuvent avoir sur l'évolution de l'art de bâtir. À cet endroit, le Ministère avait l'intention de promulguer, dans les années '50, des nouvelles normes qui ne considéraient guère les pratiques constructives traditionnelles ; si la population n'avait pas refusé leur adoption, les procédés vernaculaires n'auraient plus pu être adoptés dans les années à venir (Helly 1995).

L'incidence effective des projets institutionnels sur la diffusion territoriale d'un procédé constructif, sur son évolution dans le temps, mais également sur le niveau de connaissance scientifique à son égard, est très bien représentée par le cas de la maçonnerie de pierre. Dans la première moitié du XX^e siècle, une méfiance généralisée envers ces constructions aurait conduit dans plusieurs pays, à l'instauration de conditions très sévères intégrées aux premières normes élaborées pour les régions sismiques⁶⁵ (Latina 1989). Deux raisons peuvent être mentionnées comme étant à l'origine d'une telle méfiance généralisée: d'une part, un manque de différenciation entre les différents types de murs lors de l'analyse des dégâts; d'autre part, un manque de prise en compte de l'état des bâtiments en amont de l'impact. Cette méfiance a eu inévitablement des répercussions également sur les recherches scientifiques entamées au cours de cette période : très rares ont été les études approfondies sur le comportement sismique des structures en maçonnerie de pierre, bien qu'elles caractérisaient une grande partie de l'environnement construit, tant urbain que rural (Lourenço 2004; Ferrigni et al. 2005). Les restrictions imposées par les normes de construction, associées à la diffusion de procédés de construction nouveaux, sur lesquels nombreuses générations d'architectes et d'ingénieurs ont fondé les bases de leur propre « culture de projet », auraient, ainsi, fortement réduit le nombre de constructions en maçonnerie et limité son utilisation dans la conservation du patrimoine bâti⁶⁶ (Latina 1989).

Le niveau d'influence des institutions sur l'évolution d'une culture constructive, par le biais du cadre normatif, est manifeste de l'implication des dynamiques socio-politiques dans la détermination de la résistance sismique du milieu bâti (Shah 2006). Notamment, la vulnérabilité aux aléas naturels peut être exacerbée, ou atténuée, par les forces institutionnelles en fonction des connaissances scientifiques et des enjeux éthico-politiques et économiques. En fait, ceux-ci s'entrecroisent en vue de définir le seuil de tolérance en matière de prévention et de déterminer le prix effectif qu'une société est « prête à payer » pour réduire sa propre vulnérabilité (Oliver-Smith 1999; Fressoz 2012).

En Suisse, par exemple, le processus de décision relatif aux mesures de protection sismique à entreprendre sur le bâti existant, se base sur la notion de « *proportionnalité* » - permettant d'évaluer le rapport entre les intérêts et les objectifs -, ainsi que sur le « *risque individuel* » - compris comme « *la probabilité moyenne qu'une personne décède suite à un séisme* » (Lestuzzi 2013). L'idée d'une telle approche est de pouvoir fixer des limites d'investissements considérés comme raisonnables ; en fait, la procédure suivie⁶⁷ implique la détermination d'un « *niveau de sécurité minimum exigé* », en référence au « *risque individuel acceptable* »⁶⁸.

65 En Italie, la maçonnerie de pierre a été presque totalement délaissée dans les règlements, suite à l'observation des dégâts induits par le séisme de 1909 ; en Nouvelle-Zélande, elle a été partiellement condamnée suite à celui de Napier de 1931.

66 Par les biais de la charte d'Athènes, rédigée en 1931, les signataires ont recommandé l'emploi du béton armé pour les travaux de renforcement des monuments historiques.

67 Cette procédure est présentée dans le document intitulé *SIA 2018 (Cahier technique) Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants*, publié en 2004 par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes.

68 Plus précisément, le lien entre la valeur de risque individuel acceptable - établie par comparaison avec d'autres risques - et la sécurité structurale des bâtiments, s'effectue à l'aide d'un « *facteur de conformité* » qui quantifie dans quelle mesure un ouvrage existant répond aux exigences normatives posées pour un ouvrage neuf (Lestuzzi 2013). Ce facteur est considéré comme une « *valeur limite* » en dessous de laquelle des mesures de consolidation sismique doivent être impérativement prises. En revanche, en dessus de cette valeur, des analyses coûts-bénéfices supplémentaires doivent être effectuées pour décider de la convenance d'éventuelles mesures de protection, en fonction de leur niveau d'efficacité à réduire le risque, du taux d'occupation de l'ouvrage et de sa durée de vie estimée.

De manière générale, l'ensemble des critères considérés dans la détermination du niveau de sécurité du bâti dépend essentiellement du seuil de tolérance des acteurs impliqués, notamment les représentants des milieux politiques et scientifiques ainsi que les administrateurs publics. Des règlements trop stricts impliquant des investissements prohibitifs sont susceptibles de conduire à une situation où « rien n'est entrepris » en vue de renforcer les environnements bâtis, par manque de ressources financières individuelles ou publiques (Wagner & Delaloye 1996). Tandis que des règlements trop souples ne favorisent pas l'application de mesures de précaution participant, en conséquence, à une recrudescence « autorisée » de leur vulnérabilité. Ainsi, le niveau de protection d'une société se résume à une « *construction socioculturelle du risque* » (Oliver-Smith 1999) défini selon les rapports de force entre les acteurs impliqués au niveau institutionnel : un « *produit culturel* » fortement corrélé à des questions de nature éthique et philosophique mais également aux intérêts économiques en jeu (Ligi 2009).

La portée de ces rapports de force devient évidente si l'on considère, d'un côté, le savoir scientifique sur la dangerosité d'un territoire et, de l'autre, les décisions prises au niveau institutionnel en matière de protection. Par exemple, lors du séisme qui a affecté la ville italienne de L'Aquila en 2009, les valeurs de l'accélération maximale du sol⁶⁹ estimées par les sismologues quelques années auparavant⁷⁰, n'étaient pas encore intégrées dans les normes de construction à suivre pour la réalisation de nouvelles structures (Travaglio 2009; Galeota 2010; Amato & Galadini 2013). Une telle divergence entre les renseignements découlant de recherches en sismologie et le cadre normatif effectif constitue une insuffisance qui peut se révéler fatale ; et ceci même pour les personnes qui habitent dans des bâtiments nouveaux conformes aux lois en vigueur.

Au sein des sociétés du passé comme dans celles contemporaines, le niveau de vulnérabilité sismique du bâti est donc corrélé à la nature du lien entre la « *structure sociale et culturelle* » des milieux humains et leur environnement construit et naturel : deux « *entités interdépendantes* » (Oliver-Smith 1999). Les événements catastrophiques y sont liées dialectiquement ; par ce fait, ils peuvent être considérés comme « *symptomatiques* » du niveau d'adaptation des « *systèmes socioculturels* » aux conditions définies par leur environnement physique mais également culturel (Ibid.).



Fig.14 Turquie, après le séisme de Kocaeli de 1999 : effondrement d'un bâtiment récent et résilience d'une construction vernaculaire dans la ville d'Adapazari (Crédit : Langenbach).

69 La valeur de l'accélération maximale du sol est intégrée dans les normes de construction parasismique comme mesure indicative des mouvements du sol pouvant survenir dans un site spécifique ; elle correspond au principal paramètre employé par les ingénieurs pour le dimensionnement des structures.

70 Source : Institut National italien de Géophysique et de Volcanologie (INGV).

2.3. AMPLIFICATION DANS LE TEMPS DE LA VULNÉRABILITÉ SOCIALE

2.3.1. CARACTÈRES PROPRES À UNE CATASTROPHE

Les catastrophes se caractérisent par une « *variabilité objective* » qui se réfère à l'ensemble des phénomènes déclenchant un événement potentiellement catastrophique, ainsi que par une « *complexité subjective* » rapportée à l'ensemble des événements d'ordre social, environnemental, culturel, politique, économique et technologique (Oliver-Smith 1999).

Un événement catastrophique est donc à mettre en corrélation avec le « *réseau des relations qui relie la société (l'organisation et les relations chez les individus et les groupes), l'environnement (le réseau de liens avec le milieu physique dans lequel les personnes et les groupes sont à la fois constitué et constituant), et la culture (les valeurs, normes, croyances, attitudes et connaissances se rapportant à cette organisation et ces relations)* » (Ibid., p.28-29, trad. M.H.). Plutôt qu'un événement isolé, une catastrophe est à percevoir en tant que processus défini dans le temps par l'interaction entre l'agent à caractère destructeur (l'aléa naturel) et la société exposée (Cannon 2008) : une « *construction sociale* » se définissant bien avant sa survenance en fonction des conditions qui augmentent la vulnérabilité (Wisner et al. 2004). Le degré de dévastation lors de l'impact d'un aléa naturel est, de fait, défini comme la résultante de l'interaction entre ses variables physiques et la vulnérabilité sociale⁷¹ spécifique à la communauté frappée, ou à un des groupes qui la composent (Ligi 2009).

D'un côté, plusieurs niveaux de vulnérabilité sociale peuvent subsister simultanément au sein d'une même société. La composante sociale peut être tangible dans la grande divergence des effets subis par des communautés de groupes socioéconomiques différents, à tel point qu'on parle, parfois, de « *séisme de classe* », comme dans le cas du tremblement de terre ayant affecté le Guatemala en 1976 (Wisner et al. 2004). À cette occasion, la mauvaise qualité des habitations des plus pauvres ainsi que les caractéristiques défavorables de leurs sites d'implantation ont provoqués des pertes humaines et matérielles beaucoup plus importantes que parmi les gens de la classe moyenne, lotis dans des habitations plus résistantes et situées dans des lieux plus sûrs.

D'autre côté, la vulnérabilité sociale d'un pays ou d'une région peut être affectée par des processus socioéconomiques qui ont lieu à une échelle plus globale, reflétant les systèmes politiques et économiques internationaux (Cannon 1994). Ainsi, les politiques néolibérales d'ajustement structurel, imposées dans les années '80 à de nombreux pays en voie de développement, ont contribué à augmenter la vulnérabilité de la population locale, notamment par l'affaiblissement des efforts consacrés à l'éducation (Wisner et al. 2004).

Pour mieux cerner certains des processus sociétaux déterminant une vulnérabilité sociale accrue, il est utile de se référer aux raisons susceptibles d'être à l'origine des échecs dans les manières dont un groupe d'individus réagit aux problèmes d'ordre environnemental, en particulier les échecs se rapportant à leur anticipation et à leur résolution.

2.3.2. RAISONS SOCIÉTALES DES ÉCHECS DANS L'ANTICIPATION ET LA RÉOLUTION DES PROBLÈMES

Les raisons pouvant amener une société à échouer dans l'anticipation d'un problème, avant que ceci ne survienne, peuvent être de plusieurs types (Diamond 2009).

Tout d'abord, cette condition peut être déterminée par l'oubli des expériences antécédentes, à cause d'une faible fréquence du problème ou d'un manque de moyens efficaces pour témoigner de leur impact. L'intervalle temporel que les informations à disposition recouvrent peut ne pas inclure des événements rares mais auxquels, en réalité, les sociétés sont exposées : la période de retour d'un tremblement de terre destructeur pouvant être de plusieurs siècles, la familiarité avec le risque sismique peut être très

⁷¹ La vulnérabilité sociale est entendue en tant que « *caractéristiques d'une personne ou d'un groupe et de leur situation, influençant leur capacité à anticiper, à faire face, à résister et à se redresser de l'impact d'un aléa naturel* » (Wisner et al. 2004, p.11, trad. M.H.).

réduite. Ainsi, la reconnaissance de facteurs indiquant un potentiel danger peut n'avoir pas lieu, du fait qu'ils ne font pas partie intégrante de l'expérience vécue et/ou transmise. À cet égard, la disponibilité des informations et leur accessibilité assument un rôle important dans la perception du risque (Coburn & Spence 1992). En effet, plus le nombre d'informations sur un événement est grand, plus cet événement est pris en compte comme étant probable. L'information technico-scientifique et/ou celle diffusée par les médias sur le niveau de risque sismique sont ainsi parmi les facteurs agissant sur la perception du risque au sein des populations, bien que celle-ci puisse être considérablement influencée également par le processus individuel et/ou collectif de remémoration des événements sismiques qui ont eu lieu dans le passé.

Parallèlement, la tendance à l'oubli peut se manifester indépendamment de la fréquence du problème ou des moyens de transmission des expériences vécues : même si la récurrence d'un problème est élevée, ceci n'implique pas que l'on s'appuie forcément sur les expériences du passé. Généralement, les causes sont à chercher dans l'apathie due à une ignorance généralisée en relation au risque sismique, ou dans l'acceptation d'éventuels effets négatifs du séisme résultant de l'attribution d'un sens surnaturel au phénomène sismique (Fréchet et al. 2008). À ce propos, on pourrait se questionner si certains systèmes de croyances ne coïncideraient pas à des moyens culturels de gestion du risque pour compenser l'indisponibilité des ressources pragmatiques et/ou cognitives (un manque d'argent ou de connaissances) qui seraient nécessaires pour la résolution du problème (Cannon 2008).

Ces deux raisons à l'origine des défauts dans la préparation au risque sismique mettent en évidence l'importance non seulement de développer une mémoire collective afin de ne pas oublier, mais aussi de garder, au fil du temps, la conscience éveillée pour que des réponses soient mises en place de manière systématique et courante.

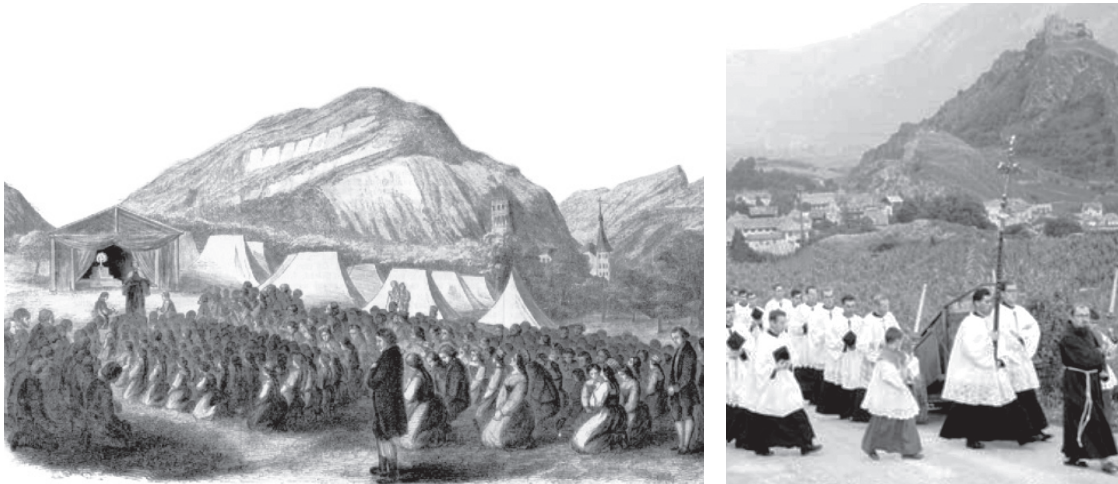


Fig.15 Attribution d'un sens surnaturel aux tremblements de terre dans le canton du Valais, Suisse : a) Messe religieuse à Viège suite au séisme de 1855 (Source : Gisler et al. 2008) ; b) Procession d'intercession contre les secousses affectant la région de Sierre en 1946 (Crédit : Schmid, Médiathèque Valais).

Les raisons pouvant amener une société à échouer dans la tentative de résoudre un problème perçu se rapportent surtout à des « *comportements irrationnels* » des individus (Diamond 2009), c'est-à-dire des comportements qui favorisent des intérêts personnels en adoptant une réaction qui est dommageable à tous, mais que la loi autorise de fait ou par non-application. Ils surgissent notamment « *quand chacun, individuellement, est travaillé par un conflit de valeurs* » ou quand il se produit chez le même individu un « *conflit entre des motivations à court terme et à long terme* »⁷² (Ibid, p.672).

⁷² Diamond mentionne également les « *comportements rationnels* ». À la différence des comportements irrationnels, ceux-ci ne sont pas dommageables à tous mais seulement à une partie de la population. Dans ce cas de figure, « *les pertes se distribuent sur un grand nombre d'individus* » et « *cela donne aux perdants peu de motivation pour se défendre, parce que chaque perdant perd peu et n'obtiendrait que des profits réduits, incertains et lointains, quand bien même réussirait-il à défaire ce que la minorité a accompli* » (Diamond 2009, p.661).

Une première raison à la base des comportements irrationnels se rapporte à la « pensée de groupe » : « *forme moins prégnante et à petite échelle de la psychologie des foules* » (Ibid, p.672 ; Le Bon 1895). Elle apparaît notamment lorsqu'un groupe de décideurs « *essaie de parvenir à une décision dans des circonstances de stress où le besoin de soutien et d'approbation mutuels peuvent conduire à annihiler les doutes et la pensée critique, à partager des illusions, à parvenir à un consensus prématuré et finalement à prendre une décision catastrophique* » (Diamond 2009, p.673).

Même si de nos jours les causes d'une catastrophe sont de moins en moins attribuées à une volonté surnaturelle (comme c'était le cas avec la théorie de la rétribution), certaines attitudes subliment le problème du risque sismique en évoquant une « *fatalité résignée* » de nature laïque (Latina 1989). Un tel comportement est à mettre en lien avec le fait qu'essayer de gérer un problème signifierait devenir responsable des conséquences que ceci pourrait provoquer, si aucune mesure est entreprise. De fait, souvent « *les pouvoirs publics préfèrent ignorer les risques potentiels* » car « *en perdant la mémoire des événements du passé, il y a disparition de la responsabilité* » (Kunz 1996). La protection de la société civile passerait alors inévitablement au deuxième plan par rapport à d'autres affaires guidées par des priorités qui sont antagoniques au « *principe de précaution* »⁷³ prônant le risque zéro (Lascoumes 1996; Walter 2008; Fressoz 2012).

La deuxième raison qui amène à l'adoption de comportements irrationnels est le « *déni d'origine psychologique* » s'installant chez les individus quand la perception d'une chose suscite une « *émotion douloureuse* » (Diamond 2009). Dans ce cas de figure, la « *chose* » perçue « *sera inconsciemment supprimée ou niée afin d'éviter cette douleur, angoisse ou peur, quitte à ce que le déni conduise à des décisions désastreuses* » (Ibid., p.673). Ce déni peut représenter une attitude qui, d'un côté, permet aux personnes exposées aux tremblements de terre de vivre dans une normalité quotidienne, mais qui, d'autre côté, pourrait - en fonction des facteurs culturels et psychologiques déterminant les comportements collectifs - augmenter inlassablement leur vulnérabilité, car aucune réaction de prévention est entreprise au fil du temps (Cannon 2008).

2.3.3. ENNEMIS SISMQUES INVISIBLES

Parmi les processus sociétaux qui concourent à la genèse d'une catastrophe, certains déterminent une aggravation de la vulnérabilité sismique d'un milieu physique et humain, sans que leur vraie dangerosité soit pleinement et facilement identifiable et reconnue. En raison de la grande difficulté à les distinguer, ils sont considérés comme étant des « *ennemis invisibles* » (Ligi 2009).

Certains des « *ennemis invisibles* » potentiels peuvent être rapportés à la gestion du risque sismique ; ci-dessous, trois exemples permettent de mettre en évidence la portée que ces « *ennemis* » peuvent avoir sur la détermination de la vulnérabilité des milieux, en référence à des schémas interprétatifs et à des modèles théoriques relatifs aux tremblements de terre.

Tout d'abord, le niveau de vulnérabilité des environnements bâtis peut s'amplifier au cours du temps par des schémas interprétatifs incorrects.

En dépit du fait que le bâti ancien ait survécu indemne au fil des siècles, cela ne signifie pas qu'il ne soit pas concerné par le risque sismique (fig.17). La performance des architectures très anciennes peut en effet diminuer dans le temps à cause de phénomènes naturels ordinaires (notamment la pluie et l'humidité) et/ou extraordinaires (comme les tremblements de terre) ainsi qu'en raison de phénomènes d'origine humaine, tels que des transformations non adaptées sur le plan structurel (Ferrigni et al. 1993).

⁷³ Le « *principe de précaution* » est évoqué dans un article du traité constitutif de l'Union européenne (art. 130 R dans le Traité de Maastricht devenu 174 avec le Traité d'Amsterdam) et qui est à la base de la politique de l'Union Européenne en matière d'environnement. Ce principe est apparu pendant les années '60 et a été mis en avant pendant la conférence de Rio en 1992, conjointement au concept de développement durable (Walter 2008). Avec ce principe, toute décision doit prendre en compte l'ensemble des répercussions possibles, les plus probables comme celles qui le sont moins, et cela sur le court terme comme dans le long terme (Lascoumes 1996). En matière de gestion du risque sismique, il requiert donc qu'on agisse en mettant en place des mesures qui permettent d'éviter des risques stochastiques reportés - « *ceux pour lesquels l'état des connaissances à un moment donné ne permet pas d'anticiper des effets dommageables qui se manifesteront à moyen ou long terme* » - ainsi que les risques résiduels, ceux qui sont « *connus mais qui en deçà d'un certain seuil ne peuvent plus être rationnellement appréhendés* » (Ibid, p.363).

Ainsi, elles ne sont pas à considérer *a priori* comme indestructibles⁷⁴ et donc exemptes d'une attention particulière et constante, comme c'est d'ailleurs souvent le cas pour le bâti formant les centres historiques (Marincioni et al. 2012).



Fig.16 Destruction du château d'Arnoldstein en Carinthie (Autriche) lors d'un tremblement de terre en 1348 : fresque réalisé par le peintre allemand Nicolas Würmser en 1360 (Source : Kozák et Cermák 2010).



Fig.17 Bâti ancien et tremblements de terre, Italie : a) Ecoulement de la Tour de l'Horloge de Finale Emilia datant du XIII^e siècle, provoqué par la séquence sismique ayant affecté la région de l'Emilie-Romagne en 2012 (Crédits : Carozzino) ; Conséquences néfastes d'interventions récentes : b) Création d'une grande ouverture à l'angle de l'immeuble au rez-de-chaussée pour la réalisation d'un garage, Verchiano après le séisme des Ombres de 1997 (Source : Ferrigni et al. 2005) ; c) Réalisation d'un chaînage en béton armée au niveau du toit visant l'amélioration de la résistance sismique du bâtiment en maçonnerie, Tempéra après le séisme de L'Aquila de 2009 (Source: Bazzurro et al. 2009).

74 Le Parthénon dans l'Acropole d'Athènes (Grèce) est représentatif de la lente mais dangereuse augmentation de la vulnérabilité à laquelle les constructions anciennes sont exposées ; bien que pendant 2500 ans ce monument ait survécu à de nombreux tremblements de terre, en 1981, il a subi des dégâts sismiques relativement importants (Touliatos 1993; Toganidis 2007).

En outre, la vulnérabilité sismique de l'environnement bâti peut être augmentée, de manière indirecte, par des modèles théoriques de référence incomplets.

En raison de renseignements lacunaires sur les conditions géologiques et géotechniques locales⁷⁵ (Mayer-Rosa 1996), la transposition du savoir scientifique dans les normes de construction est exposée à un certain niveau d'erreur par rapport au danger effectif présent dans un territoire (Woo 2011). Cette divergence peut conduire à une situation dans laquelle même des structures conformes au cadre normatif et aux savoirs contemporains subissent des dégâts sismiques importants, comme ça a été le cas récemment en Turquie (Giardini 2006). La puissance effective des tremblements de terre qui se produisent peut se révéler plus élevée de celle prise comme référence dans la conception des bâtiments.

L'incertitude épistémique en relation aux phénomènes sismiques peut également conduire à des agissements humains qui menacent directement la sécurité de l'environnement bâti et celle de ses habitants : c'est le cas des séismes induits⁷⁶ (Ellsworth 2013). Leur problématique vis-à-vis du bâti existant n'est pas négligeable car, même si leur puissance est généralement limitée, ils peuvent parfois être relativement forts et provoquer des dégâts⁷⁷ ; ceci même dans des régions avec une sismicité modérée ou faible⁷⁸. En raison du niveau de méconnaissance élevé sur le phénomène des séismes induits⁷⁹ (Ibid.), les risques qui leur sont associés sont à considérer en tant que risques stochastiques reportés⁸⁰. En tant que tels, ils seraient à inclure dans les politiques de gestion du risque sismique, au nom du principe de précaution (Lascoumes 1996) ; toutefois, cela n'est pas toujours le cas⁸¹.

Finalement, certains processus sociétaux coïncident avec des « représentations sociales »⁸² constituant « un instrument d'orientation de la perception des situations et d'élaboration des réponses » (Serge Moscovici dans Fischer 1987, p.130). À long terme, ces processus peuvent conduire à un affaiblissement de la sensibilité sismique comme à stimuler son amplification. Le niveau de prévoyance au sein d'une société peut ainsi considérablement fluctuer, au fil du temps, en renforçant ou en appauvrissant la culture locale du risque.

75 Par exemple, 50% des tremblements de terre ayant eu lieu en Californie entre 1985 et 1995 a été localisé le long de failles dont l'activité sismique n'était pas connue précédemment (Mayer-Rosa 1996).

76 Lorsque des activités humaines déclenchent un brusque mouvement de masses rocheuses au niveau d'une faille, un séisme peut être induit ; ceci peut se manifester avec l'élimination des eaux usées par injection dans les formations du sous-sol ou pendant le processus industriel de fracturation hydraulique.

77 Le séisme (M 5.1) qui a eu lieu en 2011 à Lorca (Espagne), susceptible d'avoir été induit par le pompage des eaux souterraines, a provoqué des dégâts importants, voire des effondrements partiels.

78 En Suisse, lors de forages dans le canton de Saint-Gall en 2013, deux tremblements de terre (M 3.5 et M 4.1) ont été ressentis dans un rayon de 15 kilomètres, provoquant aussi des fissures dans de nombreux immeubles (Source : site internet du Service Sismologique Suisse, accessible à l'adresse www.seismo.ethz.ch/index).

79 Trois considérations peuvent être formulées à propos de l'incertitude épistémique à l'égard du phénomène des séismes induits (Ellsworth 2013). Premièrement, la connaissance actuelle envers les systèmes des failles à l'échelle mondiale n'est pas exhaustive et, donc, elle ne peut pas constituer une base fiable pour le choix d'éventuels sites industriels. Deuxièmement, la corrélation entre les activités humaines et les séismes induits n'est pas facile à déchiffrer : en fait, les séismes peuvent se produire loin des sites concernés ainsi qu'après plusieurs mois ou années. Troisièmement, même si les séismes induits pourraient - en théorie - être maîtrisés, cela nécessiterait une connaissance systémique des masses rocheuses du sol se trouvant le long des failles, de l'état des efforts et de la pression interstitielle qui agissent sur les failles, ainsi que des perturbations engendrées par les processus industriels ; ce qui n'est pas toujours le cas aujourd'hui.

80 C'est-à-dire des risques « pour lesquels l'état des connaissances à un moment donné ne permet pas d'anticiper des effets dommageables qui se manifesteront à moyen ou long terme » (Lascoumes 1996, p.363).

81 Certains pays (tels que la France) ont approuvé des moratoires sur le processus industriel de fracturation hydraulique, sur la base du principe de précaution. En Suisse, les activités d'injection à haute pression d'eau dans le sol qui avaient induit, entre 2006 et 2007, des secousses dans la ville de Bâle ont été interrompues ; cet événement n'a pourtant pas conduit, jusqu'à maintenant, à une moratoire sur ce type d'activité.

82 Les « représentations sociales » sont entendues en tant que « système de valeurs, de notions et de pratiques relatives à des objets, des aspects ou des dimensions du milieu social, qui permet [...] la stabilisation du cadre de vie des individus et des groupes » (Serge Moscovici dans Fischer 1987, p.130).

3. LE BÂTI : MATÉRIALISATION D'ASPECTS CULTURELS CORRÉLÉS AU FACTEUR SÉISME

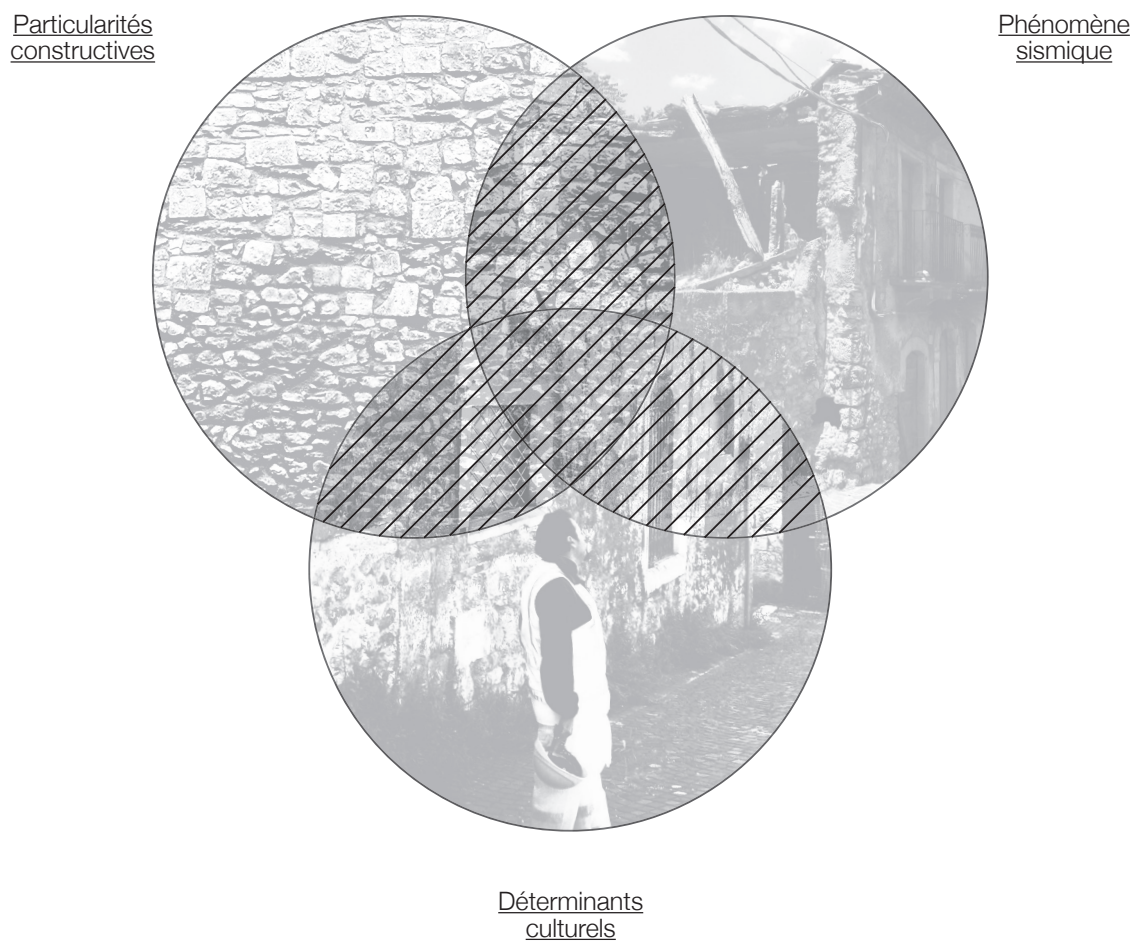
Les conséquences d'un événement sismique varient considérablement selon les caractéristiques du lieu physique, en fonction des particularités du bâti et de l'environnement naturel, et selon les spécificités des milieux humains, en fonction des comportements des individus mais, surtout, des positions assumées par les institutions structurant la vie en société. L'ensemble des actions et des décisions que ces dernières entreprennent, par le biais d'initiatives publiques ou par la définition de normes en matière de construction, définit non seulement le niveau de vulnérabilité sismique de l'environnement bâti, mais également le niveau de vulnérabilité sociale. Les positions prises par les institutions publiques sont le résultat d'une construction socioculturelle du risque définie, à l'heure actuelle, principalement par les connaissances scientifiques disponibles, ou considérées comme prépondérantes, et des enjeux éthico-politiques et/ou économiques.

Parallèlement, les sociétés ont depuis longtemps essayé de rendre intelligible le phénomène sismique, par la lecture des signes qui y sont associés (signes *ante-rem*, *in-re*, *post-rem*), afin de mieux cerner son caractère et ses spécificités et, donc, de s'en protéger. Selon les interprétations et le sens attribués à ces signes sismiques, les moyens élaborés pour gérer le risque sismique diffèrent d'une culture à l'autre et, simultanément, varient de manière considérable au cours du temps. Toutefois, la vulnérabilité d'un certain milieu humain à une période donnée peut être influencée par des stratégies élaborées auparavant et, donc, par le niveau de sensibilité sismique qui caractérisait les communautés des siècles précédents. En effet, les mesures constructives et comportementales adoptées par celles-ci non seulement ont modelé l'environnement bâti mais elles font partie intégrante de l'histoire culturelle du lieu.

Par rapport aux éléments présentés ci-dessus, émerge l'intérêt d'investiguer davantage l'influence des cultures du risque « anciennes » sur la détermination de la résilience sismique des sociétés actuelles. Pour ce faire, cette recherche de thèse intègre un cas d'étude particulier où l'environnement bâti vernaculaire est considéré en tant que matérialisation d'aspects culturels étroitement corrélés au *facteur séisme*. Plus précisément, l'environnement bâti est ici examiné comme un milieu imprégné de stratégies de résilience qui se rapportent, d'une part, à des mesures constructives réduisant la vulnérabilité des artefacts et, de l'autre, à des attitudes et des comportements précautionneux adoptés par les populations locales.

L'étude de cas effectuée en relation à cette première partie de la thèse se focalise donc sur des domaines d'analyse découlant du croisement des thématiques suivantes (tab.2) :

- les « déterminants culturels », entendus comme les principaux facteurs d'ordre culturel exerçant une incidence marquée sur les comportements individuels et collectifs face au phénomène sismique ;
- le « phénomène sismique », en tant que tremblements de terre historiques et récents ayant eu des effets importants sur l'environnement construit et sur les milieux humains ;
- les « particularités constructives », c'est-à-dire les caractéristiques locales du bâti ancien ayant jusqu'à présent résisté à de nombreux événements sismiques.



Tab.2 Schéma des domaines d'analyse principaux (surface hachurée) découlant du croisement des trois thématiques considérées pour l'étude de cas de cette partie.

ÉTUDE DE CAS : RÉSILIENCE SISMIQUE ET CULTURE DU RISQUE - PROVINCE DE L'AQUILA, ITALIE -

4. INTRODUCTION

Cette étude se concentre sur les modalités selon lesquelles les cultures du risque « anciennes » concourent à la détermination de la résilience sismique actuelle des environnements bâtis et de la population. Elle s'intéresse tant aux architectures vernaculaires qui ont résisté à des tremblements de terre qu'à la connaissance populaire à l'égard de leurs spécificités structurelles, en examinant les principaux facteurs qui influent et stimulent la perception du risque au sein de la population.

4.1. LOCALISATION

Le territoire considéré correspond à la province de L'Aquila dans la région des Abruzzes, en Italie centrale. Pendant l'enquête sur le terrain, 14 communes ont été visitées ; celles-ci coïncident à des villes de taille importante, telles que L'Aquila (chef-lieu de la province) et Sulmona, comme à des bourgades situées aux alentours de ces deux centres urbains⁸³.

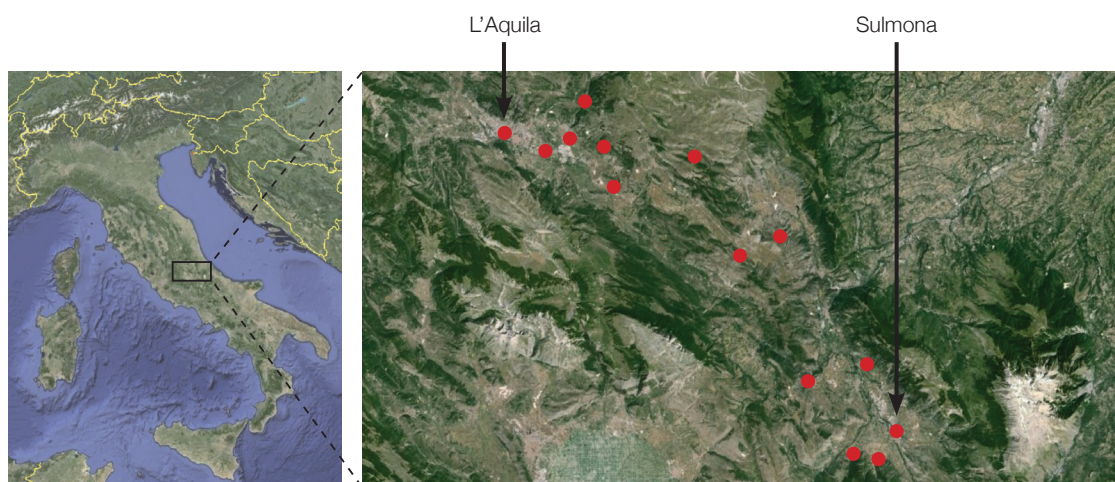


Fig.18 Localisation : a) Italie centrale ; b) Carte indiquant l'emplacement des sites considérés (Source : Google Earth).

4.1.1. CARACTÉRISTIQUES DE L'ACTIVITÉ SISMIQUE

La province de L'Aquila a été historiquement frappée par des tremblements de terre particulièrement violents, notamment en 1349, en 1461 et en 1703. Au cours du XIX^e siècle, 18 séismes se sont produits d'une intensité sismique supérieure à VIII, entraînant un niveau de dommage considérable, voire des effondrements partiels. Au cours du XX^e siècle, 41 tremblements de terre se sont produits dans un rayon de 100 km autour de la ville de L'Aquila, d'une magnitude supérieure à 5 ou d'une intensité sismique supérieure à VII, provoquant des dégâts⁸⁴.

Le dernier séisme avec des effets marqués au niveau du territoire coïncide avec celui du 6 avril 2009, de puissance égale à M 6.3⁸⁵ : le premier grand tremblement de terre à avoir frappé une zone urbaine italienne depuis celui de 1908 dans la région de Messine et de Reggio de Calabre (Tertulliani et al. 2011).

83 Les communes visitées sont les suivantes : L'Aquila, Bazzano, Bugnara, Camarda, Capestrano, Introdacqua, Navelli, Paganica, Pescomaggiore, Poggio Picenze, Raiano, Roccacasale, Santo Stefano di Sessanio, Sulmona.

84 Source : Institut National italien de Géophysique et de Volcanologie (INGV).

85 L'épicentre du séisme a été localisé à une profondeur de 10-12 Km.

L'impact du séisme de 2009 a été très important. Environ 300 personnes sont décédées, dont les deux tiers dans la ville de L'Aquila ; le centre historique de dizaines de communes a été détruit et plus de 40'000 personnes n'ont pas pu retourner dans leur maison. Les dégâts sur le bâti ont concerné une zone d'un diamètre d'environ 50 kilomètres : 42 des 57 communes affectées se situent dans la province de L'Aquila. Les dégâts les plus importants se sont produits le long d'un axe diagonal s'étendant du Nord Ouest vers le Sud Est, correspondant à la structure sismogénique du système de failles de Paganica (Galli & Camassi 2009).

L'hétérogénéité géologique et morphologique du terrain de l'ensemble de ce territoire a déterminé une grande diversité dans l'importance des mouvements du sol (Bazzurro et al. 2009). En raison de l'effet de site⁸⁶, la distribution des dommages sur le territoire a été très irrégulière, avec des degrés d'intensité sismique élevés même dans des zones relativement éloignées de l'épicentre.

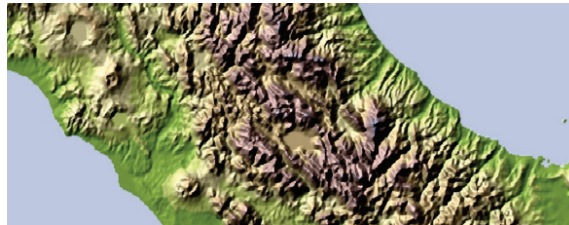


Fig.19 Carte du relief du territoire des Apennins où se situe la province de L'Aquila (Source : www. treehouse-maps.com).

Une différenciation du niveau des dommages a été constatée même entre des sites très proches, voire entre des ouvrages à seulement quelques centaines de mètres de distance (Ibid.). Par exemple, dans la commune d'Onna, se situant dans la plaine sur un sol sédimentaire, plus de 50 % du centre historique a été endommagé de manière irréparable. En revanche, à Monticchio, situé sur un flanc de colline avec un sol rocheux et éloigné de Onna de seulement 2 kilomètres, ce pourcentage a été « seulement » de 25%. La très grande influence de la nature du sol a été mise en évidence également par des accéléromètres situés dans une zone rocheuse et dans une zone sédimentaire de la ville de Navelli (Galeota 2010). À cet endroit, à l'occasion d'une réplique du séisme de 6 avril 2009, les pics d'accélération en zone sédimentaire ont été le double de ceux enregistrés en zone rocheuse et la durée de la secousse a été presque triple.

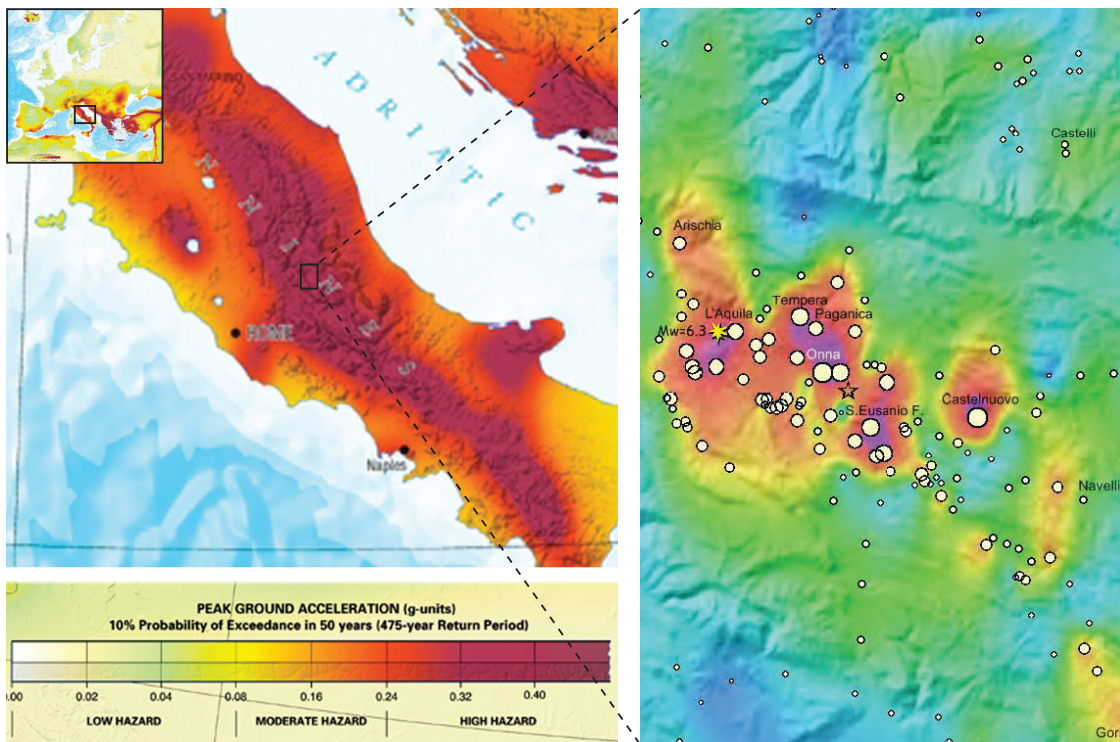


Fig.20 Carte du risque sismique en Italie centrale indiquant les valeurs de l'accélération maximale du sol pouvant survenir sur une période de 475 ans (Crédit : Giardini, Jiménez & Grunthal).

Fig.21 Extension des dégâts provoqués par le tremblement de terre de 2009 : les couleurs indiquent l'importance des dommages dans l'environnement bâti, du bleu au violet en ordre croissant (Crédit : DPC-INGV).

⁸⁶ On parle d'effet de site quand les conditions locales modifient les secousses sismiques ; en fait, un site peut être perçu comme un système qui amplifie ou atténue les ondes qui se propagent dans le sol.

4.1.2. CARACTÉRISTIQUES DU BÂTI CONSIDÉRÉ

Dans plusieurs communes du territoire considéré, l'environnement bâti est composé en grande partie de constructions de 2 à 4 étages, en maçonnerie de pierre de taille ou en moellons, édifiées au cours des siècles (Bazzurro et al. 2009). Elles représentent 20 % de la ville de L'Aquila et 50 % dans les autres communes. Un type de mur très répandu est celui appelé *muro a sacco* : un double mur en pierre avec un blocage au milieu de cailloux et de morceaux de briques cuites mélangés à un mortier de chaux ou en terre crue (Ibid.). Généralement, les planchers sont constitués d'un système de voûtes en maçonnerie, au rez-de-chaussée, et de solivage en bois, aux niveaux supérieurs, tandis que les toitures se composent d'une charpente en bois supportant une couverture en tuiles en terre cuite (Rossetto et al. 2009).

Les monuments historiques, tels que les palais et les églises, présentent en général des maçonneries considérablement plus soignées que dans les bâtiments résidentiels (Ibid.) ; ils se caractérisent par des blocs mieux taillés et de dimensions plus importantes.



Fig.22 Architectures vernaculaires : a) L'Aquila ; b) Raiano.



Fig.23 Architectures vernaculaires : a) Camarda ; b) Santo Stefano di Sessanio.

4.2. MODES D'INVESTIGATION SUR LE TERRAIN

Sur place, le travail s'est appuyé sur trois activités principales : l'examen du bâti vernaculaire, les échanges avec les habitants et des entretiens avec des professionnels du secteur de la construction ainsi qu'avec un chercheur universitaire.

L'étude du bâti vernaculaire a été conduite en différentes communes qui diffèrent quant à leur distance de l'épicentre du séisme de L'Aquila de 2009 et quant à la portée des dommages subis en cette occasion. Certains sites se trouvent à proximité immédiate de l'épicentre où l'on observe des dégâts très importants et généralisés (tels que la ville de L'Aquila) tandis que d'autres ont subi beaucoup moins de dommages et se situent à une plus grande distance de l'épicentre (tels que la ville de Sulmona, à 50 kilomètres de L'Aquila). Le travail sur le terrain a porté sur l'examen, principalement depuis l'extérieur, d'un large nombre de bâtiments (environ 200) afin de saisir les particularités constructives améliorant leur comportement envers l'aléa sismique.

Au cours des échanges avec les habitants résidant dans la province de L'Aquila, 42 entretiens ont été réalisés. Ceux-ci se sont déroulés de manière informelle dans les espaces publics (rues, places, restaurants) et ils se sont focalisés sur les thématiques suivantes :

- la performance sismique du bâti vernaculaire ;
- la prise en considération du risque sismique dans les cultures constructives vernaculaires ;
- le rôle structurel des éléments constructifs caractérisant le bâti vernaculaire ;
- le niveau d'attention porté aux particularités du bâti vernaculaire dans la pratique constructive contemporaine.

Les entretiens ont visé à connaître l'opinion des personnes au regard de ces thématiques, en la mettant en corrélation avec le nombre de tremblements de terre qu'elles ont vécus⁸⁷. Pour ce faire, des questions particulières ont été élaborées ; elles se basent sur quatre constats spécifiques aux thématiques considérées, pour investiguer le niveau d'adhésion et ses motivations⁸⁸ (cf. annexe 1.).

Pendant ces échanges, des photographies d'architectures locales ayant subi très peu des dégâts lors du tremblement de terre de 2009 ont parfois été montrées en tant qu'exemples, afin d'alimenter la discussion avec des cas concrets et des bâtiments connus par les interlocuteurs.

Sur place, j'ai rencontré également des personnes directement impliquées dans la reconstruction post-séisme. En particulier, l'architecte Gianfranco D'Alò, du bureau de la Soprintendenza pour les Biens Architecturaux et Paysagistiques des Abruzzes, m'a permis de saisir les enjeux liés au bâti historique⁸⁹. Tandis que la rencontre avec l'anthropologue et chercheur universitaire Dr. Antonello Ciccozzi (Université des Etudes de L'Aquila) a favorisé la compréhension de facteurs d'ordre socioculturel étroitement corrélés au risque sismique⁹⁰.

87 Le nombre de séismes vécus a été évalué sur la base des informations fournies par les personnes avec lesquelles ont eu lieu les entretiens ainsi que par déduction, combinant leur âge et l'activité sismique locale.

88 L'opinion des personnes au regard des constats formulés a été évaluée sur la base de trois niveaux d'adhésion (D'accord / Pas d'accord / Ni d'accord ni en désaccord) et les raisons à la base de ces avis ont été approfondies par le biais de questions ouvertes (« Pourquoi ? Comment ? Quoi ? Qui ? Quand ? Où ? »). Les appréciations et/ou les remarques les plus significatives sont mentionnées en note de bas de page dans les chapitres suivants.

89 Rencontre ayant eu lieu le 11 juillet 2013 au siège de L'Aquila de la Soprintendenza pour les Biens Architecturaux et Paysagistiques des Abruzzes.

90 Rencontre ayant eu lieu le 10 juillet 2013 à l'Université des Etudes de L'Aquila.

5. ELÉMENTS ÉMERGENTS

En observant le niveau des dommages de l'environnement bâti suite au séisme de 2009, on peut remarquer comme la plupart des constructions anciennes, en particulier celles datant des XV^e et XVIII^e siècles (périodes des deux grands tremblements de terre historiques), ne se sont pas complètement effondrées même lorsqu'elles ont été fortement endommagées (D'Antonio 2013). Dans la plupart des cas, des dégâts importants se sont produits à l'intérieur des bâtiments, où les planchers se sont partiellement ou totalement écroulés ; toutefois, rares ont été les cas où les murs en maçonnerie de pierre se sont complètement désagrégés. La bonne performance globale de ces constructions est, d'ailleurs, attestée par le fait que le nombre de décès provoqué par leur effondrement est réduit.

Le niveau de vulnérabilité sismique des environnements bâtis est fortement corrélé aux cultures du risque qui se sont développées au cours des siècles passés. Ces dernières exercent également une influence marquée sur les perceptions et les réactions humaines, individuelles et/ou collectives, face au phénomène sismique ; elles ont de fait un rôle considérable dans la détermination de la vulnérabilité sociale. L'influence des mesures de protection adoptées dans le passé sur la manière actuelle de se rapporter au risque sismique s'exerce selon plusieurs modalités, de manière plus ou moins explicite.

Les chapitres suivants présentent les éléments identifiés comme des facteurs reliant la résilience des sociétés contemporaines à des stratégies de protection développées dans le passé. Ces éléments se rapportent aux aspects suivants : le rôle de la mémoire individuelle et collective ; le niveau de connaissance actuelle sur les particularités du bâti ancien améliorant sa résistance sismique ; la nature de l'interaction entre les représentations populaires et institutionnelles du risque.

5.1. MÉMOIRES INDIVIDUELLES ET COLLECTIVES RAPPORTÉES AU PHÉNOMÈNE SISMIQUE

L'influence de la mémoire individuelle et collective sur les différentes manières de se rapporter au phénomène sismique est ici analysée en faisant référence aux grands tremblements de terre qui ont affecté la ville de L'Aquila au cours des siècles. Ceci en considérant notamment le rôle de cette mémoire en relation à trois processus : la rationalisation des expériences sismiques du passé ; l'élaboration mémorielle post-séisme et sa remémoration successive ; la collectivisation de références sismiques alimentant la perception du risque.

5.1.1. PROCESSUS DE RATIONALISATION DES EXPÉRIENCES SISMQUES DU PASSÉ

Fondée au milieu du XIII^e siècle, L'Aquila est la ville italienne qui, après Messine et Catane, a été affectée pendant les dernières mille années par le plus grand nombre de séismes ayant provoqué des dégâts très importants à l'environnement bâti (Galeota 2010). Avant 2009, les trois plus importants événements sismiques ont eu lieu en 1349 (M 6.5), en 1461 (M 6.4) et en 1703 (M 6.7)⁹¹.

Ces événements sismiques ont eu un caractère très destructeur, en effet, à chaque fois la ville de L'Aquila a été réparée et reconstruite. Ils coïncident donc avec des moments importants au point de vue architectural et urbanistique. Le tremblement de terre de 1461 est considéré par les historiens comme la cause primaire de la disparition des habitations médiévales, alors que celui de 1703 comme étant l'événement à l'origine de l'urbanisme actuel du centre historique (Tertulliani et al. 2011).

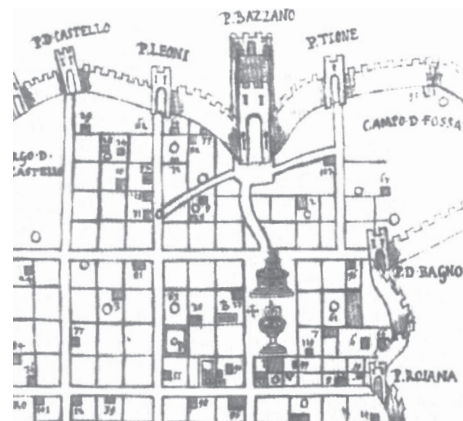


Fig.24 Extrait de la carte de la ville de L'Aquila dessinée par Pico Fonticulano en 1575 et montrant la régularité urbaine de la reconstruction après le séisme du XV^e siècle (Source : D'Antonio 2013).

Par rapport aux tremblements de terre de 1461 et de 1703, il est particulièrement intéressant de noter le comportement différent adopté par la population et les autorités locales pendant les séquences sismiques qui les ont précédées (Antonini 2010; Gasparroni 2010; Lettere 2012; Ciccozzi 2013).

En 1461, la population commença à s'inquiéter de ce qui pouvait se produire en constatant l'intensification des secousses sismiques qui affectaient la région depuis déjà plusieurs mois. En effet, 112 ans auparavant un séisme avait provoqué le décès de nombreuses personnes dans des circonstances semblables, soit après une longue série de secousses. Suivant un processus de « *rationalisation populaire* » (Ciccozzi 2013) de l'expérience des tremblements de terre destructeurs du passé, mais également de ceux moins puissants et plus récents (comme celui de 1456), le cardinal en charge à cette époque ordonna une évacuation de masse, tout en se souciant de mettre en place des mesures permettant le déroulement d'une vie ordinaire. Des cabanes en bois furent réalisées dans les espaces publics afin d'accueillir les habitants et il fit fermer les églises, non sans oublier de faire installer des autels sur les places afin que les rites religieux, cérémonies et prières, pouvaient continuer à être pratiqués.

Cette réactivité face à la séquence sismique en cours peut être considérée comme une mesure de précaution qui a permis de sauver un nombre considérable de personnes lorsque le séisme le plus intense eut lieu : le nombre de décès a été estimé à 150 sur une population comptant 18'000 habitants, alors que 242 ans après, lorsqu'un grand tremblement de terre frappa à nouveau la ville, presque un tiers de la population péri, environ 2'500 des 8'000 habitants (Lettere 2012). À cette occasion, aucune

91 Néanmoins, d'autres séismes encore plus anciens ont eu lieu, comme témoigné par les fouilles paléo-sismologiques effectuées en correspondance de la faille de Paganica : les analyses des sédiments et de leur déformation ont permis de déterminer cinq événements sismiques ayant intéressé exclusivement cette faille, pendant les dernières cinq mille années (Cinti et al. 2011).

mesure d'urgence n'avait été adoptée bien que plusieurs secousses avaient été ressenties déjà pendant quatre mois. D'après l'avis d'un haut représentant institutionnel de l'époque, le nombre élevé de décès devait, de fait, être mis en relation avec le constat que la plupart des personnes se trouvaient au moment des secousses les plus intenses dans des « lieux fermés et dangereux » (Gasparroni 2010, p.13).

La divergence dans les pourcentages des victimes provoquées par ces deux tremblements de terre historiques peut être rapportée à une attitude différente en ce qui concerne le processus de rationalisation et de capitalisation des expériences sismiques du passé : l'une particulièrement précautionneuse, l'autre excessivement amnésique.

5.1.2. PROCESSUS D'ÉLABORATION MÉMORIELLE POST-SÉISME ET SA REMÉMORATION SUCCESSIVE

Un récit datant de trois mois après le séisme de 1703 souligne que « dans une tragédie, si déplorable, ne manquèrent pas des actions de compassion, afin de la rendre mémorable plus que toute autre catastrophe » (Antonini 2010, trad. M.H.). Ces mots assument une signification toute particulière dans une situation de crise : la volonté explicite et déclarée de ne pas oublier un tel événement catastrophique. C'est vraisemblablement dans un tel processus de consolidation de la mémoire collective relative aux séismes que certains aspects de nature culturelle, caractérisant encore aujourd'hui la vie des habitants de L'Aquila, trouvent leur origine. La volonté de nourrir la mémoire collective semblerait, en effet, avoir favorisé le développement de réactions concrètes, se rapportant tant à la « sphère spirituelle » qu'à la « sphère matérielle » (Castelli & Camassi 2007).

On présente ci-après certaines des actions entreprises suite à l'événement sismique de 1703, que l'on peut considérer comme représentatives d'une stratégie de protection à long terme basée sur la mémoire.

SPHÈRE SPIRITUELLE

En 1703, la religion catholique occupait un rôle de premier plan au sein de la ville de L'Aquila, comme dans d'autres régions italiennes. Cette importance ne se manifesta pas seulement dans la manière d'interpréter le phénomène sismique - une dimension surnaturelle était souvent attribué aux tremblements de terre - mais également dans la nature des réponses socioculturelles ayant suivi l'impact sismique (Ibid.).

Tout d'abord, les réactions consécutives au séisme de 1703 ont influencé les calendriers des festivités religieuses (Galeotti 2014). Le séisme de 1703 eut lieu pendant la période du Carnaval et plus précisément le jour de la Présentation de Jésus au Temple. Lors de cet événement, une promesse collective avait alors été faite de ne plus commencer le Carnaval avant ce jour. Depuis, la durée de cette fête annuelle fut réduite et, aujourd'hui, le Carnaval de la ville de L'Aquila est celui ayant la durée la plus courte dans le monde entier.

En outre, l'adoption de nouveaux saints après le séisme de 1703 a conduit au développement de croyances étroitement liées au risque sismique. Un cas particulièrement intéressant est le culte de *Sant'Emidio*, évêque martyrisé à l'époque romaine, en 305 après J.-C. (Gasparroni 2010). Bien que ce culte datait déjà du XI^e siècle, la vénération de ce saint en tant que protecteur contre les tremblements de terre se développa précisément à la suite du séisme de 1703, du fait que la ville dont il était le patron (Ascoli Piceno) fut épargnée de la destruction. C'est en fait à cette occasion que parmi la population émergea une recherche marquée d'une protection divine : *Sant'Emidio* devint ainsi co-patron de la ville de L'Aquila et une statue fut réalisée en son honneur.



Fig.25 Iconographie de *Sant'Emidio* (Source : www.comune.castelfidardo.an.it).



Il est intéressant de préciser que le culte de *Sant'Emidio* n'aurait pas trouvé sa genèse dans le milieu officiel des ordres religieux, mais plutôt au sein des communautés locales (Castelli & Camassi 2007). D'ailleurs, une corrélation directe entre ceci et les régions exposées au risque sismique se développa de manière spontanée au fil du temps dans tout le territoire italien. Ce culte a même fait l'objet d'une « internationalisation » : sa vénération a été documentée en Espagne et au Portugal, en particulier après le séisme de Lisbonne de 1755 (Vincent 1996).

Fig.26 Carte de la diffusion de la vénération de *Sant'Emidio* en Italie indiquant les lieux où son culte a été formalisé (cercle gris), la fête en son honneur est célébrée (croix) et il a été reconnu en tant que patron ou co-patron (cercle avec point) (Crédit : Castelli & Camassi).

SPHÈRE MATÉRIELLE

Bien que les réponses socioculturelles à l'événement sismique de 1703 se sont essentiellement rapportées à la sphère spirituelle, elles ont en partie concerné également la « sphère matérielle » et leurs résultats sont encore bien visibles aujourd'hui.

Suite à cet événement, l'héraldique de la ville de L'Aquila fut modifiée afin de manifester le sentiment collectif ayant suivi ce séisme particulier : le rouge et le blanc, typique du symbolisme de l'Eglise catholique, furent modifiés avec le vert, symbolisant l'espoir, et le noir, en mémoire du deuil (Ciccozzi 2013; Galeotti 2014). Toutefois, la bichromie blanc et rouge a survécu au fil du temps dans les milieux religieux et elle continue à être employée encore aujourd'hui, notamment pour les insignes du diocèse de la ville.

Les réactions post-séisme de nature symbolique n'ont pas épargné l'environnement construit ; deux exemples peuvent être mentionnés car représentatifs du lien indirect que le bâti peut tisser avec le phénomène sismique.

L'église du XVIII^e siècle officiellement appelée *Chiesa di Santa Maria del Suffragio* (située en place du Duomo) fut construite en 1713 en souvenir des victimes du séisme de 1703 et en remplacement de l'église originale endommagée. À cette occasion, la population lui attribua la nouvelle dénomination de *Chiesa delle Anime Sante*, soulignant l'idée de commémoration des victimes. Sur sa façade principale, une inscription en latin (datant de 1755) permet d'ailleurs d'élucider la nature du soutien de l'Eglise dans le processus de redressement de la population suite à une catastrophe : « aux morts, ce ne sont pas les larmes qui sont utiles, mais plutôt les prières, les supplications et les aumônes » (trad. M.H.). Volontairement ou non, le séisme de 1703 fut un moment où se produisirent non seulement une consolidation du lien entre la population et l'Eglise, mais également une amélioration des ressources financières de cette dernière⁹².

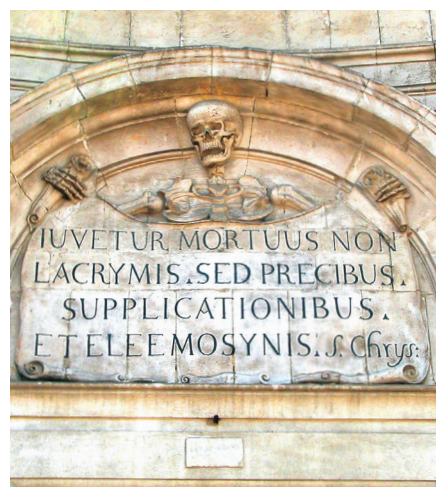


Fig.27 Inscription sur l'église *delle Anime Sante*.

⁹² Source : site internet du conseil régional des Abruzzes, accessible à l'adresse www.regione.abruzzo.it.

Un élément architectural parfois considéré comme le résultat des réactions successives au séisme de 1703, est la présence de fleurs de lys en fer battu sur les façades de certains bâtiments du centre historique de la ville de L'Aquila (fig.28). Elles correspondent aux tirants qui ont été intégrés aux murs par les bâtisseurs de l'époque pour éviter leur rupture en cas de séisme. D'après l'écrivaine Laudomia Bonanni (1907-2002), ces éléments décoratifs coïncideraient à un témoignage d'offrande *ex-voto* posés sur les bâtiments qui ont résisté aux secousses sismiques de 1703 : ils attesteraient la gratitude et la dévotion des survivants pour remercier d'une « *grâce obtenue* » (Giustizieri 2014). L'origine de ces fleurs de lys n'a toutefois pas encore été éclaircie dans sa totalité : d'après l'architecte Maurizio D'Antonio, elles représentent des éléments décoratifs datant du XV^e siècle caractérisant les bâtiments de la Renaissance (D'Antonio 2013). Qu'elles aient été mises en œuvre avant ou après le séisme de 1703, ces fleurs de lys sont représentatives de l'importance qui était attribuée à la mémoire du phénomène sismique, plus spécifiquement, à la mémoire du rôle structurel des tirants en tête desquels elles ont été disposées.



Fig.28 Fleurs de lys fixées aux tirants : a) Bâtiment de quatre niveaux dans le centre historique de L'Aquila, b) Vue rapprochée.

STRUCTURE DE MÉMOIRE CIVIQUE

Une multitude d'éléments commémoratifs tangibles encore de nos jours constituent des liens directs avec le passé, composant une « *structure de mémoire civique* » grâce à laquelle « *le subconscient collectif* » essaie de garder le « *fil de la mémoire* » du lieu (Ciccozzi 2013, p.137, trad. M.H.). La présence de ces éléments, touchant à la sphère spirituelle et/ou matérielle, peut conduire à supposer que tous les événements sismiques désastreux du passé ont encouragé l'essor d'un « *subconscient collectif capable de lire la dangerosité de la ville* » au travers de la mise en place d'« *un code [...] caché dans des symboles* » (Ibid., p.135, trad. M.H.). En fait, le simple acte de remonter aux origines de ces symboles permet de redécouvrir, et mieux cerner, l'histoire du lieu rapportée au phénomène sismique⁹³. Un tel processus de redécouverte à l'échelle individuelle alimenterait, constamment et spontanément, une mémoire sismique collective propre au lieu, entendue en tant que « *mémoire en commun* » : « *chacun gardera en mémoire des éléments de la mémoire collective en les liant d'une manière personnelle et les habillera selon un point de vue bien précis et unique* »⁹⁴.

L'ensemble de tous les éléments renvoyant aux tremblements de terre historiques peut donc être considéré comme un système référentiel qui permet de limiter la tendance à relativiser le risque sismique - tendance nécessaire pour vivre dans un contexte perpétuellement menacé -, en stimulant, par le biais d'un processus de remémoration et de restauration mémorielle, un sentiment de prévoyance nécessaire pour garder éveillée l'attention à l'égard d'un agent potentiellement destructeur.

93 Communication personnelle avec l'anthropologue Antonello Ciccozzi.

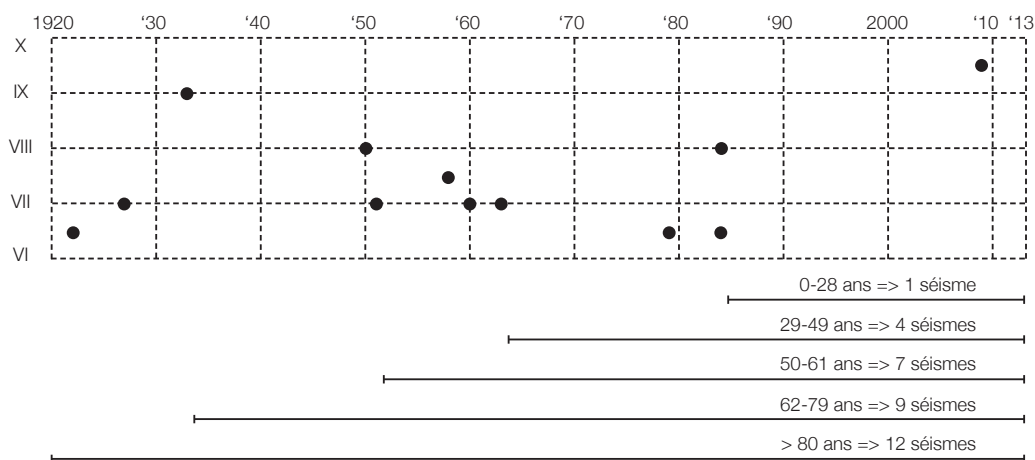
94 Définition extraite du site internet de l'*Observatoire B2V des mémoires*, accessible à l'adresse www.observatoireb2vdesmemoires.fr.

5.1.3. PROCESSUS DE COLLECTIVISATION DE RÉFÉRENCES SISMIQUES ALIMENTANT LA PERCEPTION DU RISQUE

Aujourd'hui, trois types spécifiques de références se rapportant explicitement aux événements sismiques déterminent la perception du risque au sein de la population. Ces « références sismiques » peuvent être :

- directes, résultant d'expériences vécues ;
- semi directes, découlant de la transmission d'expériences de tiers ;
- indirectes, relatives aux événements sismiques historiques qui n'ont pas été vécus par les habitants d'aujourd'hui.

Les références directes et semi directes se rapportent à des séismes relativement récents. Si on examine l'historique des tremblements de terre ayant eu lieu dans la province de L'Aquila, on constate l'importance que ces références peuvent revêtir. Pendant la période de 1920 à 2013, 12 événements sismiques se sont produits avec des secousses intenses, très clairement ressenties par la population⁹⁵. Ces événements correspondent à des périodes distinctes, ce qui détermine une « expérience sismique » différente selon l'âge des personnes, c'est-à-dire un nombre différent de séismes vécus. Si on se réfère aux tranches d'âge déterminées en fonction de ces périodes (tab.3), le pourcentage de ceux qui connaissent très bien l'activité sismique locale des derniers cents ans augmente de manière constante avec l'âge. Parmi ceux ayant moins de 28 ans (1 séisme vécu), ce pourcentage est relativement faible ; celui-ci augmente avec les personnes ayant entre 29 et 49 ans (4 séismes vécus) ; alors que parmi ceux âgés de plus de 49 ans (au moins 7 séismes vécus), les événements du dernier siècle sont bien connus par tous. En revanche, les plus jeunes sont très au courant de l'activité sismique « en cours » grâce à des technologies relativement récentes tels que les sites internet documentant en temps réels les tremblements de terre.



Tab.3 Tableau combinant l'année et le degré d'intensité sismique des 12 séismes d'une intensité supérieure à VI, produits pendant la période de 1920 à 2013, avec les cinq tranches d'âge déterminées sur la base du nombre de séismes ressentis.

En plus des références directes et semi directes, il y a celles se relatant à des événements plus anciens. Ces références indirectes permettent de se confronter avec les séismes historiques d'autres époques (1703, 1461, etc.) favorisant l'acquisition d'une connaissance davantage étalée dans le temps au regard de l'historique sismique local. Les informations relatives à ces événements se diffusent sous forme écrite mais également sous forme orale, par exemple lorsque l'origine d'une ville ou d'un village qui a été reconstruite après sa destruction est relatée.

⁹⁵ Ces 12 événements se caractérisent par une intensité sismique supérieure au degré VI, indiquant que toutes les personnes ressentent les secousses : 1922, Bassa Val Roveto (I = 6-7) ; 1927, Media Val Roveto (I = 7) ; 1933 Maiella (I = 9) ; 1950, Gran Sasso (I = 8) ; 1951, Gran Sasso (I = 7) ; 1958, L'Aquila (I = 7-8) ; 1960, Marsica (I = 7) ; 1963, Amatrice (I = 7) ; 1979, Valnerina (I = 6-7) ; 1984, Appennino abruzzese (I = 8) ; 1984, Appennino abruzzese (I = 6-7) ; 2009, L'Aquila (I = 9-10). Pour repérer les niveaux d'intensité, je me suis référé aux cartes macrosismiques élaborées par l'Institut National italien de Géophysique et de Volcanologie, accessibles sur son site internet à l'adresse http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/consultazione/query_eq.

Ce qui est particulièrement intéressant de souligner par rapport au niveau de perception du risque sismique, c'est que certaines situations atypiques peuvent représenter des moments très favorables à son accroissement. Nombreux sont ceux qui affirment que pendant la séquence sismique ayant affecté la province de L'Aquila entre 2008 et 2009, une très forte progression généralisée s'est produite dans la connaissance populaire sur la sismicité historique locale, et notamment sur le grand tremblement de terre de 1703. Ceci en raison de la grande similitude des circonstances⁹⁶. En fait, le tremblement de terre du 6 avril 2009 a représenté le moment le plus intense d'une séquence sismique commencée le 14 décembre 2008, quatre mois avant la secousse principale. Pendant cette période, des centaines de secousses ont agité un territoire très vaste s'étendant sur plus de 30 km, de la ville de L'Aquila à celle de Sulmona. À partir du 22 février 2009 le nombre de secousses et leur puissance ont augmenté ; le 17 et le 29 mars, deux séismes ont eu lieu dans la zone de Sulmona (M 3.7 et 3.9), tandis que le 30 mars un autre secoua la ville de L'Aquila provoquant des dégâts sur le bâti (M 4.1). L'intensification des secousses ayant précédé le séisme du 6 avril 2009 a donc constitué un moyen de sensibilisation au regard du risque local allant jusqu'à augmenter la perception du risque au sein de la population⁹⁷. En effet, dans une telle circonstance, toutes les références sismiques (directes, semi-directes ou indirectes) provenant d'une source orale ou écrite, se combinent et se répandent de manière beaucoup plus intense et efficace que dans une situation normale de « calme tectonique ».

La prise de conscience générale qui s'est produite pendant la séquence sismique au regard des grands tremblements de terre du passé peut être perçue comme une des composantes de la culture locale du risque. De fait, *a posteriori* on peut constater que les similitudes entre les séquences sismiques ayant touché la ville de L'Aquila en 1461, en 1703 et en 2009 sont multiples (Antonini 2010; Gasparroni 2010; Ciccozzi 2013) :

- la séquence ayant précédé le séisme le plus intense a duré plusieurs mois (4 mois en 1703 et en 2009) ;
- le séisme le plus intense a été précédé par des secousses toujours plus puissantes (en 1461, en 1703 ainsi qu'en 2009) ;
- quelques jours avant le séisme le plus intense, une secousse a provoqué des dégâts sur le bâti (en 1703 et en 2009).⁹⁸

La collectivisation des connaissances individuelles qui a eu lieu pendant la séquence sismique n'est pas un aspect anodin car c'est exactement à l'échelle collective que les questionnements fondamentaux relatifs au risque interagissent le plus souvent : « savoir quand il faut avoir peur » et « savoir oublier cette peur dans la vie quotidienne ». Ainsi, la culture locale du risque émergerait en tant que processus collectif de recherche du sens des secousses en cours au travers la restauration mémorielle des expériences sismiques du passé (Ciccozzi 2013). Elle ne repose donc pas seulement sur la performance du bâti, mais aussi sur la réduction de la vulnérabilité des habitants au danger imminent par une prise de conscience du risque réel qui stimule l'essor de « *comportements positifs* » incitant à ne pas sous-évaluer le risque (Castelli & Camassi 2007). En fait, les comportements qui ont été les plus fréquents parmi les habitants de L'Aquila pendant la séquence sismique entre 2008 et 2009, ont coïncidé avec ceux adoptés en 1461, consistant à sortir pour quelques heures des habitations lorsqu'une secousse se produit (Ciccozzi 2013).

L'émergence d'une perception accrue du risque dans un moment jugé critique est représentative de l'importance que la dimension comportementale d'une culture du risque « ancienne » peut revêtir, encore de nos jours, dans la détermination des réactions humaines, notamment dans la définition des comportements à adopter en cas de danger.

96 « Un monsieur habitant dans mon immeuble était très préoccupé par rapport aux secousses en cours ; il était en train de lire un ouvrage sur l'histoire de la ville de L'Aquila rapportant que le grand séisme de 1703 fut précédé par une série de secousses très semblable » (Source : entretien à L'Aquila, le 30 juin 2013).

97 « On a commencé à discuter de tremblements de terre et de l'histoire sismique de la ville de L'Aquila principalement pendant la séquence sismique » (Source : entretien à Paganica, le 8 juillet 2013).

98 En outre, on peut également noter que la partie du centre historique de la ville de L'Aquila ayant subi le niveau d'endommagement le plus élevé lors du séisme de 2009 correspond à la partie Nord Ouest (où se situe le 39 % des bâtiments effondrés) comme ce fut le cas aussi en 1703 (Tertulliani et al. 2010).

5.2. CONNAISSANCE POPULAIRE SUR LES PARTICULARITÉS CONSTRUCTIVES PARASISMQUES

Dans l'environnement bâti considéré, on peut constater la présence de particularités constructives qui améliorent sa performance sismique et/ou qui réduisent le risque pour les habitants lors de tremblements de terre particulièrement puissants. De ce fait, elles sont susceptibles d'être l'expression de la dimension constructive de la culture locale du risque ; un témoignage de l'existence d'une culture constructive vernaculaire parasismique.

Ci-après, des considérations techniques à leur propos sont combinées à des constats d'ordre socioculturel, sur la base de l'analyse du bâti effectuée et des échanges avec les habitants. Des remarques sont formulées à l'égard de la connaissance populaire des particularités constructives parasismiques, en faisant ressortir les actuelles divergences cognitives à ce sujet et le rôle que ces mêmes particularités du bâti assument dans le processus qui permet de renouer avec les traditions constructives du lieu.

5.2.1. EFFETS DU SÉISME DE 2009 SUR LE BÂTI

Suite au séisme de 2009, plus de 1'700 bâtiments du centre historique de la ville de L'Aquila (99 % du bâti global) ont été analysés par un groupe de chercheurs italiens dans l'optique d'évaluer l'intensité sismique du tremblement de terre⁹⁹ (Tertulliani et al. 2011). Globalement, il résulte de cette analyse que 47% du bâti a subi des dégâts modérés et des dégâts importants pour 20 % du bâti. Plus précisément, il a été constaté que tous les bâtiments en maçonnerie en moellons ont été affectés et qu'environ 50% a subi des défaillances importantes des murs ainsi que des déstabilisations partielles des toits et des planchers. Il résulte en outre que ceux en maçonnerie de pierre de taille, représentant 46% du bâti, ont subi des fissures importantes dans la plupart des murs. Le séisme n'a pas concerné exclusivement les édifices ordinaires, mais aussi les monuments, dont plus de 90 % ont subi au moins des dégâts structuraux modérés ; 23 % s'est révélé être utilisable, 26 % partiellement inutilisable et 51 % complètement inutilisable (Cifani et al. 2009). Il est intéressant de préciser que 75 % des palais correspondent à ce dernier cas de figure, alors que ce pourcentage diminue à 37 % pour les églises, ce qui indique que celles-ci furent très probablement édifiées avec une attention accrue envers le risque sismique.

Les principaux facteurs identifiés par les chercheurs comme augmentant la vulnérabilité des maçonneries en moellons, type de mur le plus répandu parmi les architectures vernaculaires, sont les suivants (Bazzurro et al. 2009; Kaplan et al. 2010) :

- la disposition irrégulière de moellons induisant une faible compacité des murs ;
- la mauvaise qualité du mortier employé pour la mise en œuvre des moellons ;
- l'absence de pierres en boutisses traversantes dans les maçonneries réalisées avec la technique du double mur ;
- le manque de chaînes d'angle en pierre de taille entre les murs orthogonaux ;
- des défauts d'ancrage entre les murs et les planchers et/ou la toiture ;
- le rapport élevé entre les ouvertures (portes et fenêtres) et la surface globale du mur ;
- l'emplacement des ouvertures près des angles.

Néanmoins, il est important de préciser que la plupart des bâtiments ayant subi des dégâts très importants a fait l'objet de transformations qui ont modifié le système structurel d'ensemble (D'Antonio 2013). Parmi celles-ci, on peut mentionner l'introduction d'éléments rigides tels que des escaliers internes en béton armé, le remplacement d'éléments structuraux horizontaux de nature flexible tels que des planchers en bois, avec des éléments plus rigides tels que des dalles en béton armé¹⁰⁰.

99 L'intensité sismique évaluée pour le centre historique de L'Aquila équivaut aux degrés VIII-IX sur l'échelle macrosismique EMS-98, indiquant que des dégâts importants et des effondrements ont eu lieu (Tertulliani et al. 2011). En raison de la dimension du territoire considéré et de la diversité des types de structures analysés, cette étude représente le cas le plus complexe de mise en application de l'échelle EMS-98 en Italie.

100 Communication personnelle avec l'architecte Gianfranco D'Alò.

5.2.2. DIVERGENCES COGNITIVES ET PARTICULARITÉS CONSTRUCTIVES PARASISMIQUES

L'actuelle connaissance populaire des caractéristiques du bâti ancien augmentant sa résistance sismique diffère considérablement d'une particularité constructive à l'autre. Un exemple représentatif de cette divergence se rapporte à deux types de tirants qui ont prévenu le renversement des murs en maçonneries de pierre lors du séisme de 2009 : l'un employant une âme métallique et l'autre étant réalisé avec des rondins en bois.

Les tirants métalliques solidarisent les murs en maçonnerie de pierre entre eux, constituant ainsi un système de connexion qui améliore leur liaison : des fissures peuvent se produire à l'intersection de murs orthogonaux sans qu'un effondrement total du bâtiment ait lieu. Généralement, les tirants mis en œuvre pendant la réalisation sont intégrés dans la maçonnerie, alors que ceux qui ont été ajoutés par la suite, en tant que mesure de renforcement, se trouvent à quelques centimètres du mur sur le côté intérieur (D'Antonio 2013). Dans le cas de maçonneries en moellons, des pierres de taille ou des plaques métalliques ont été souvent disposées en correspondance des ancrages de façade (fig.30b), très probablement afin de renforcer cet endroit, où, de fait, une forte concentration de contraintes se produit lorsque les tirants sont sollicités.



Fig.29 Tirants métalliques : a) Schéma de leur emplacement ordinaire aux niveaux des planchers et de la toiture ; b) Sulmona ; c) Camarda.

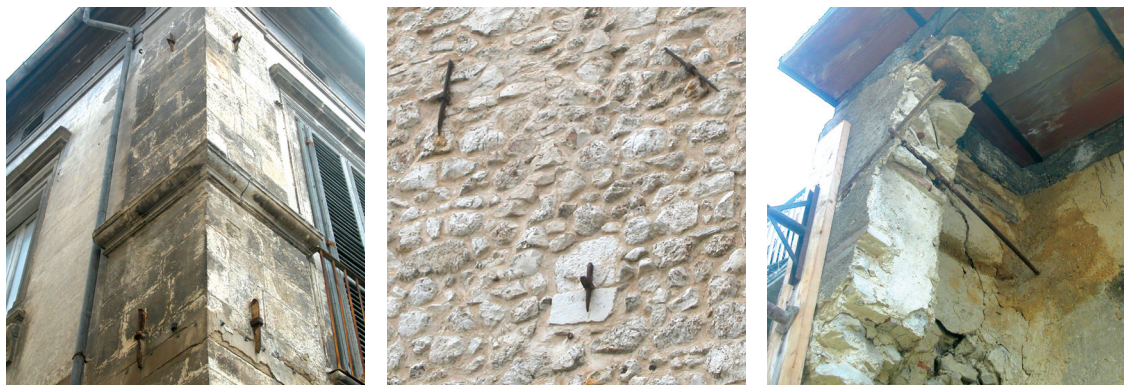


Fig.30 Tirants métalliques : a) Sulmona ; b) Navelli ; c) Paganica.

L'importance des tirants métalliques en cas de séisme est très valorisée dans l'imaginaire collectif, indépendamment de l'âge des personnes, et leur fonction structurelle est relativement bien connue¹⁰¹. La plupart des personnes sont de l'avis que les bâtisseurs vernaculaires les ont mis en œuvre en relation directe au risque sismique. Les personnes les plus âgées possèdent même des connaissances très

¹⁰¹ « Les tirants métalliques préviennent le renversement des murs extérieurs même si les planchers s'écroulent, ce qui réduit le danger pour le gens se trouvant à l'extérieur » (Source : entretien à Santo Stefano di Sessanio, le 28 juin 2013).
« Les tirants métalliques ont sauvé plusieurs bâtiments de leur destruction totale » (Source : entretien à L'Aquila, le 25 juin 2013).

détaillées des spécificités propres aux tirants, tant au niveau de la forme que de leur emplacement au sein d'un bâtiment. Toutefois, l'importance attribuée à leur rôle structurel décroît avec la diminution de l'âge des personnes. Dans le cas des personnes de plus de 50 ans, le pourcentage de ceux qui les considèrent très efficaces dans l'amélioration du comportement du bâti est presque le double que dans les autres cas ; alors que parmi ceux qui disent ne pas savoir si les tirants ont été mis en œuvre en raison du risque sismique, ce doute est beaucoup plus répandu chez les moins de 50 ans.

Par contre, très peu de personnes sont conscientes de l'existence d'une alternative aux tirants métalliques et consistant à mettre en œuvre des rondins en bois d'environ 15-20 cm de diamètre (fig.31 a,b,c). Ceux-ci sont noyés dans la masse des murs et fixés avec deux grands clous, ou par le biais d'un crochet, à une pièce métallique d'un mètre de longueur (fig.31 d,e) dont l'ancre de façade est visible depuis l'extérieur (Ibid.). Le choix d'employer un élément en bois peut être mis en lien avec les ressources financières à disposition : forger plusieurs mètres linéaires de métal était beaucoup plus coûteux que la coupe de rondins.



Fig.31 Tirants en bois : a) Rondin noyé dans la masse du mur, Poggio Picenze ; b) Tirant visible suite au démantèlement de la maçonnerie, L'Aquila (Source : Hotel99cannelle) ; c) Ancre de façade de taille réduite, L'Aquila ; Pièces métalliques de connexion avec crochet d'ancrage (d, Crédit : D'Antonio) ou avec deux grands clous (e, Crédit : Lagomarsino).

Lors du séisme de 2009, l'efficacité des éléments en bois a été démontrée dans plusieurs cas. Nombreuses sont les constructions qui ne se sont pas complètement effondrées et cela bien qu'un mécanisme de séparation de murs orthogonaux se soit activé (Ibid.). Par exemple, dans l'église *Santa Maria degli Angeli* à Civita di Bagno, la discontinuité structurelle entre les murs extérieurs orthogonaux¹⁰² a été compensée par le système des rondins qui a de fait permis de les maintenir en place (fig.32a; Lagomarsino 2012). Par ailleurs, leur rôle structurel est explicite dans l'appellation utilisée pour les indiquer : *radiciamenti*. L'étymologie de ce mot se rattache de fait à « racine ». Ils peuvent donc être compris comme des éléments dont la fonction qui leur a été attribuée par les bâtisseurs anciens était effectivement de mieux ancrer les différentes parties structurelles. Néanmoins, sur le long terme, certains facteurs sont de nature à réduire leur efficacité, notamment le recours à une espèce de bois particulièrement sensible à l'humidité, à l'eau de pluie infiltrée dans les murs et/ou à un mortier comme la chaux.

¹⁰² Cette discontinuité entre les murs orthogonaux découle du fait que des pierres de taille sont disposées aux coins des bâtiments sans toutefois constituer des chaînes d'angles.



Fig.32 Monuments religieux renforcés avec des tirants en bois : a) Eglise *Santa Maria degli Angeli*, Civita di Bagno (Crédit : Lattanzi) ; b) Eglise *Santa Maria di Paganica* datant du XIV^e siècle, L'Aquila (Crédit : Borri) ; c) Eglise *San Biagio d'Amiternum* du XVIII^e siècle, L'Aquila (Crédit : Munari) ; d,e) Coupole de l'église *Santa Maria del Suffragio* réalisée au XIX^e siècle, L'Aquila (Crédits : d, Lagomarsino ; e, Vigili del fuoco).

Dans la ville de L'Aquila, cette pratique était adoptée déjà au XV^e siècle pour la réalisation des bâtiments après le séisme de 1461 (D'Antonio 2013) et elle était encore employée au XVIII^e siècle, pour la reconstruction qui a suivi le tremblement de terre de 1703 (Lagomarsino 2012). Il est intéressant de souligner que dans la ville de Paganica (située à 7 kilomètres de L'Aquila) certains murs édifiés après ce séisme particulier en possèdent, alors que les murs réalisés un siècle plus tard en sont dépourvus (Bazzurro et al. 2009).

Un lien étroit semble exister entre leur utilisation et les grands événements sismiques historiques. À ces occasions, les bâtisseurs de l'époque auraient effectivement pu observer que l'effondrement d'un bâtiment en maçonnerie, notamment en moellons, était toujours généré par le renversement hors plan des murs. De fait, en plus de relier entre eux les murs orthogonaux, ce système de connexion permet également de réduire le risque de renversement de la maçonnerie dans la portion centrale du mur, notamment dans les cas où les intervalles entre les murs de refend sont très importants (Lagomarsino 2012).

La raison d'une connaissance populaire relativement faible des tirants en bois est double.

D'une côté, c'est surtout avec le séisme de 2009 que cette variante s'est révélée très répandue dans le centre historique de la ville de L'Aquila (D'Antonio 2013). La destruction partielle générée par les secousses sismiques a, de fait, permis d'examiner pour la première fois la composition des murs de nombreux bâtiments. Auparavant, la lecture de quelques dessins originaux disponibles était souvent limitée en raison de la multitude d'abréviations que seuls les bâtisseurs de l'époque étaient en mesure de décrypter, empêchant ainsi une compréhension exhaustive des caractéristiques des bâtiments et de leur anatomie structurelle¹⁰³.

Par ailleurs, les informations recueillies par les professionnels en charge des travaux de démolition ou de réparation, ainsi que celles regroupées par les chercheurs ayant effectué des analyses sur le bâti historique suite au séisme, n'ont pas été diffusées de manière systématique et élargie parmi la population¹⁰⁴.

¹⁰³ Communication personnelle avec l'architecte Gianfranco D'Alò.

¹⁰⁴ À ce propos, il faut féliciter l'apparition en décembre 2013 de l'ouvrage de l'architecte Maurizio D'Antonio intitulé *Ita terraemotus damna impedire* (D'Antonio 2013), qui se focalise sur quelques mesures de protection sismique qui ont été identifiées suite au tremblement de terre de 2009 dans le bâti historique de la ville de L'Aquila, parmi lesquelles notamment les tirants métalliques et ceux en rondins de bois.

5.2.3. RÔLE DES PARTICULARITÉS CONSTRUCTIVES DANS LE PROCESSUS QUI PERMET DE RENOUER AVEC LES TRADITIONS

La majorité des personnes considère que le phénomène sismique a été un facteur pris en compte de manière systématique par les bâtisseurs vernaculaires. Nombreux sont également ceux qui évoquent son incidence dans le choix de l'implantation du bâti. Néanmoins, cette appréciation décroît de manière constante avec les tranches d'âge¹⁰⁵. Dans ces cas, l'omission du *facteur séisme* aurait été la conséquence de ressources financières limitées des propriétaires les ayant empêché d'accéder aux prestations de bâtisseurs qualifiés, de payer la main d'œuvre et/ou d'acheter les matériaux nécessaires.

Les divergences quant au niveau de connaissance populaire relative à la dimension constructive de la culture locale du risque révèlent l'influence de sa lisibilité. La visibilité des particularités constructives parasismiques dans l'environnement bâti semble avoir joué un rôle de premier plan dans la transmission, au fil du temps, des raisons ayant amené les bâtisseurs à les mettre en œuvre. En effet, les fonctions structurelles de celles qui sont moins visibles ne sont connues que par les professionnels qui ont eu l'occasion de les découvrir, lors d'interventions sur le bâti historique (D'Antonio 2013).

Ci-dessous, les particularités constructives parasismiques identifiées sur place, autre que les tirants métalliques et en bois, sont regroupées en fonction de leur niveau de lisibilité : cette différenciation coïncide avec le niveau de connaissance populaire à leur égard.

Certaines particularités constructives sont faciles à identifier car très visibles dans l'environnement bâti.

- Contreforts ponctuels

Dans certains cas, des contreforts ponctuels ont été réalisés au même temps que la construction du bâtiment, spécialement pour les monuments historiques, tels que les grands châteaux médiévaux. Néanmoins, pour les bâtiments résidentiels, les contreforts ont été généralement ajoutés *a posteriori*, suite à la destruction des constructions adjacentes due à des séismes ou à des démolitions volontaires (fig.33d). Dans ces cas, les contreforts assument ainsi la fonction de consolidation latérale qui était assurée auparavant par les bâtiments démolis.

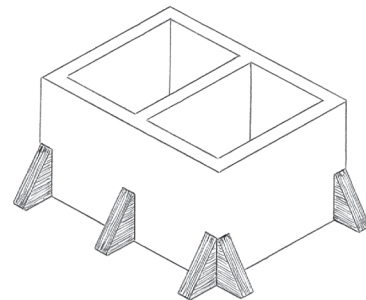


Fig.33 Contreforts ponctuels : a) Schéma ; b) L'Aquila ; c, d) Bugnara.

¹⁰⁵ L'appréciation au constat que « les sociétés anciennes prenaient en considération le phénomène sismique dans la réalisation de leur environnement bâti » se répartit par tranches d'âge de la manière suivante : > 79 ans = presque tous concordent ; 62 > 79 ans = la majorité concorde ; 50 > 61 ans = la majorité concorde ; 29 > 49 ans = la moitié concorde ; < 28 ans = avis partagés.

- Contreforts continus

Les élargissements à la base des murs correspondent à des contreforts continus qui ont été généralement ajoutés après des événements sismiques. Cette particularité représente donc une stratégie de réparation préventive : démonter et reconstruire un bâtiment ayant subi des dégâts sismiques aurait été beaucoup plus compliqué et onéreux qu'ajouter une masse supplémentaire pour consolider les parties structurales fragilisées par les secousses¹⁰⁶. Bien que la dimension de ces contreforts soit très variable, leur inclinaison est constante, elle mesure environ 80 degrés. Il est intéressant de noter qu'ils caractérisent, surtout, les constructions se situant aux angles des blocs d'habitations (fig.34d) ; ils coïncident de fait avec les endroits qui doivent contrecarrer les poussées horizontales transmises par l'ensemble des bâtiments adjacents, lors d'un séisme.

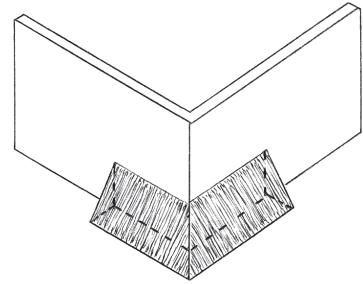


Fig.34 Contreforts continus : a) Schéma ; b) L'Aquila ; c) Poggio Picenze ; d) Raiano.

- Arcs de répartition des charges

Entre les bâtiments qui se distancient de 1 à 2 mètres, des arcs en maçonnerie de pierre ont été souvent réalisés en regard des systèmes porteurs horizontaux (planchers en bois, arcs ou voûtes). D'une hauteur propre variant entre 50 centimètres à plusieurs mètres, ces arcs constituent un ensemble continu permettant de répartir les forces horizontales entre deux bâtiments, qui se soutiennent ainsi mutuellement (Ferrigni et al. 2005). Parfois, cette fonction est assumée par des vrais et propres espaces habités, situés au-dessus des passages (fig.35d).

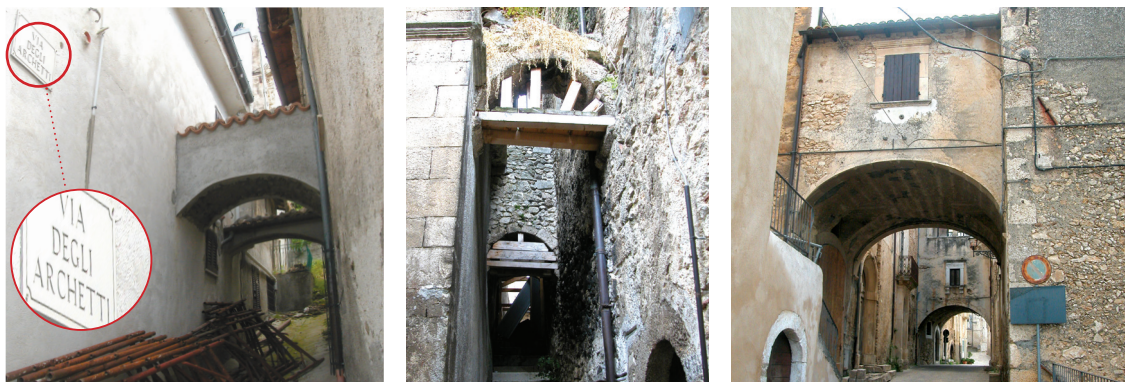
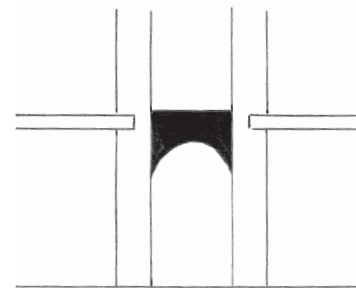


Fig.35 Arcs de répartition des charges : a) Schéma ; b) Ruelle appelée *Via degli archetti*, signifiant « chemin des petits arcs », Paganica ; c) Santo Stefano di Sessanio ; d) Navelli.

¹⁰⁶ Communication personnelle avec l'architecte Gianfranco D'Alò.

D'autre part, certaines particularités constructives parasismiques ne sont pas aisément identifiables en raison de leur taille réduite, de leur position éloignée par rapport aux zones de passage, ou car recouvertes par une couche d'enduit.

- Corniches « vides »

Les corniches de toiture de certains bâtiments se composent d'éléments métalliques recouverts de stuc. Ce type de corniche limite la masse additionnelle au sommet du bâtiment et réduit le risque pour les personnes en cas de chute, tout en permettant d'obtenir un aspect architectural similaire à celui des corniches réalisées en pierres de taille¹⁰⁷.

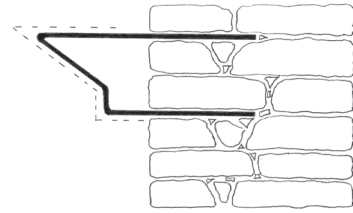


Fig.36 Corniches « vides » : a) Schéma ; b, c) L'Aquila.

- Ancrage entre les murs porteurs et la charpente du toit

Souvent, la charpente de la toiture n'est pas posée directement sur la maçonnerie, en fait, les entrails des fermes s'appuient sur des planches en bois disposées perpendiculairement par rapport mur. Ces planches dépassent les faces extérieure et intérieure du mur et sont stabilisées par des ancres verticales en bois, prévenant ainsi le risque que les fermes s'écroulent vers l'intérieur en cas de sollicitations horizontales¹⁰⁸ (fig.37b; D'Antonio 2013). Plusieurs monuments historiques de la ville de L'Aquila, surtout les églises, présentent cette particularité constructive qui assure un bon ancrage entre la structure du toit et les murs porteurs. Leur récurrence dans un bâtiment est variable : en correspondance de la plupart des entrails de la charpente, voire de tous, ou uniquement au milieu de la façade.

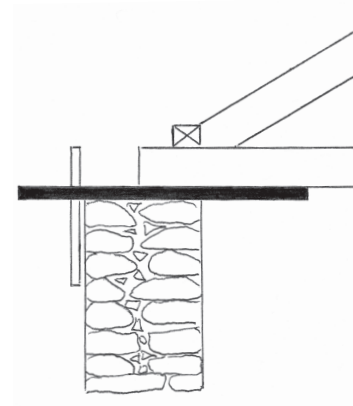


Fig.37 Ancrage entre les murs porteurs et la charpente du toit : a) Schéma ; b, c, d) L'Aquila.

¹⁰⁷ Communication personnelle avec l'architecte Gianfranco D'Alò.

¹⁰⁸ Cette solution constructive est indiquée en italien avec l'appellation *capriata impalettata*, ce qui signifie « ferme jalonnée ».

La visibilité des particularités constructives parasismiques peut jouer un rôle crucial dans la perception populaire de la vulnérabilité sismique du bâti vernaculaire¹⁰⁹. Cette perception est également influencée par l'observation des effets induits par les événements sismiques sur des bâtiments possédant des caractéristiques constructives différentes¹¹⁰. En particulier, l'observation des dégâts joue un rôle considérable surtout par rapport à l'efficacité des particularités dont la fonction structurelle n'est pas largement connue par le grand public, comme par exemple les assises en briques de terre cuite intégrées dans les murs¹¹¹.

- Assises en briques de terre cuite

Parfois, deux ou trois assises en briques de terre cuite sont insérées entre les lits des murs en maçonnerie de pierre, notamment ceux en moellons. Les briques sont disposées dans toute la section des murs avec des intervalles verticaux réguliers. Même si cet espacement peut varier d'un bâtiment à l'autre, ces assises sont généralement présentes aux niveaux des planchers, des linteaux et des appuis des fenêtres. Dans certains bâtiments, elles sont les seules parties en briques de toute la construction, tandis que dans d'autres, celles-ci ont été intégrées également à l'intersection de murs et autour des ouvertures, en formant ainsi un système continu dans les sens horizontal et vertical, comme dans le procédé constructif de la « maçonnerie chaînée »¹¹².

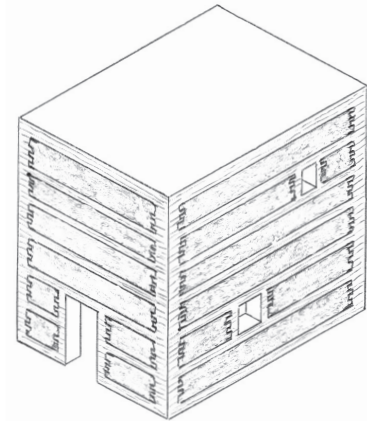


Fig.38 Assises en briques de terre cuite intégrées dans les maçonneries en moellons : a) Schéma ; b, c) Raiano ; d) L'Aquila.

109 « *Compte tenu de la puissance du tremblement de terre de 2009, je m'attendais à beaucoup plus de dégâts, voire la destruction totale du centre historique de la ville de L'Aquila* » (Source : entretien à L'Aquila, le 25 juin 2013).

110 « *Les bâtiments endommagés par le séisme de 2009 coïncident avec ceux n'ayant pas de tirants. Ceux qui en possèdent ont bien résisté* » (Source : entretien à L'Aquila, le 25 juin 2013).

111 « *Pendant le séisme de 2009, je croyais que ma maison allait s'écrouler complètement. Aujourd'hui, je remercie les bâtisseurs qui ont intégré des assises en briques cuites dans les murs en maçonnerie de pierre, car je suppose que c'est grâce à celles-ci qu'elle a bien résisté* » (Source : entretien à Raiano, le 5 juillet 2013).

112 Le procédé constructif de la « maçonnerie chaînée » utilise les mêmes matériaux employés pour la réalisation d'ossatures en béton armé avec remplissage en maçonnerie, mais selon une séquence de mise en œuvre inversée : d'abord la maçonnerie, ensuite les poteaux et les poutres (Brzev 2007 ; Schacher 2009). Ce procédé constructif a émergé spontanément au cours du XX^e siècle parmi les constructeurs des pays en voie de développement comme une alternative fiable face au risque sismique.

Les logiques amenant les habitants à affirmer que le phénomène sismique fut un facteur pris en compte par les bâtisseurs du passé reposent sur des références renvoyant directement à des événements précis. Les « références sismiques » principales coïncident avec les grands tremblements de terre de 1703 et de 2009, et avec celui qui a eu lieu en 1915 (M 7) dans la ville d'Avezzano, située à 50 km au Sud de L'Aquila. Néanmoins, cette opinion populaire repose également sur les nombreux autres événements sismiques moins destructifs à l'échelle de la province, mais dont l'impact au niveau local a été important. Chacun de ces événements constitue un point de repère permettant de mettre en lumière les particularités constructives qui font apparemment partie de la culture locale du risque - chaque lieu a sa propre histoire sismique - alimentant ainsi un processus de redécouverte qui permet de renouer avec les traditions constructives parasismiques mises au point au fil des siècles.



Corniche « vide »



Tirant métallique



Assise en briques de terre cuite



Contrefort ponctuel



Ancrage entre mur et charpente du toit



Tirant en bois



Arc de répartition des charges



Contrefort continu

Fig.39 Ensemble des particularités constructives qui font vraisemblablement partie de la culture locale du risque.

En outre, le rôle de l'observation des dégâts provoqués par un tremblement de terre dans l'élaboration de la connaissance des particularités parasismiques du bâti vernaculaire et, donc, dans la perception de sa résistance sismique, souligne l'importance du processus d'étude des environnements bâtis endommagés. En effet, le séisme de 2009 a permis d'acquérir des connaissances nouvelles et détaillées à propos des caractéristiques constructives de l'environnement architectural (D'Antonio 2013).

Certaines observations permettent même de rectifier des hypothèses émises précédemment. Par exemple, en ce qui concerne les tirants intégrés dans les maçonneries, la mise à jour dans beaucoup de bâtiments du centre historique de L'Aquila de tirants en rondins de bois a constitué une surprise et elle a invalidé l'hypothèse selon laquelle les ancrages de façades métalliques correspondaient, dans la très grande majorité des cas, à des tirants métalliques¹¹³. Parallèlement, d'autres nouvelles hypothèses, facilitant la compréhension des spécificités structurelles des constructions, peuvent être formulées. Ainsi, l'identification des bâtiments possédant des tirants en bois pourrait être effectuée en fonction des caractéristiques des ancrages de façades. Celles-ci possèdent en effet des formes et des dimensions très diverses en fonction de l'époque de fabrication (Ibid.), ce qui permet déjà de faire une première sélection. De plus, on peut supposer que la taille plus petite des ancrages de façade, par rapport à celle employée pour les tirants métalliques, découle du fait que les contraintes qu'elles doivent supporter sont inférieures, en raison du frottement qui se produit tout le long du mur entre les rondins et les unités maçonnées (Lagomarsino 2012). Certains de leurs attributs pourraient ainsi être considérés, suite à des investigations davantage approfondies, comme indicatifs du matériau employé pour l'âme du tirant.

Un tel processus de redécouverte et d'exploration de l'environnement bâti dans une situation extraordinaire, successive à un tremblement de terre, non seulement peut favoriser un renforcement des connaissances populaires sur les propriétés structurelles du bâti ancien mais pourrait aussi représenter un processus de « catharsis » face à l'événement catastrophique vécu (Matteucci 2013).

113 Communication personnelle avec l'architecte Gianfranco D'Alò.

5.3. INTERPRÉTATIONS CONTEMPORAINES DES SIGNES SISMIQUES

La perception du risque sismique constitue le fondement des réactions et des comportements humains adoptés pour y faire face ; ces derniers sont donc également influencés par le sens attribué aux secousses lors d'une séquence sismique. Dans ce chapitre, cet aspect est mis en évidence en relation à un procès judiciaire, en référence directe au séisme de L'Aquila du 6 avril 2009. Il s'agit d'un procès qui est actuellement en cours : le jugement du premier degré a été promulgué par le tribunal d'instance en octobre 2012¹¹⁴ ; celui du second degré, émis par la cour d'appel, date de novembre 2014¹¹⁵.

L'intérêt de prendre en compte ce procès judiciaire est inhérent à la nature des faits qu'y sont examinés, en particulier l'interférence qui peut subsister entre les représentations du risque intrinsèques aux cultures populaires et celles qui sont diffusées par les représentants des institutions publiques. Pour ce faire, on se réfère essentiellement à une expertise technique d'anthropologie culturelle conduite dans le cadre de ce procès, et sur laquelle s'est fondée, en large partie, le jugement du premier degré.

L'intention n'est pas d'analyser les motivations de la sentence rendue, ni d'ailleurs de la juger, ni même de s'exprimer sur la responsabilité pénale des personnes concernées, mais plutôt de mettre en évidence certains aspects d'ordre anthropologique qui sont susceptibles d'agir sur la vulnérabilité sociale des milieux humains.

5.3.1. INFLUENCE DE LA PERCEPTION CULTURELLE DU RISQUE SUR LA VULNÉRABILITÉ SOCIALE

Lors de la première instance judiciaire, sept membres du comité national pour la prévision et la prévention des grands risques (CGR)¹¹⁶ qui s'étaient réunis à L'Aquila six jours avant le tremblement de terre, c'est-à-dire le 31 mars 2009, afin d'évaluer le niveau de danger en relation à la séquence sismique en cours depuis 4 mois, ont été condamnés à six ans de prison pour blessures et homicide involontaire multiple¹¹⁷.

D'après les attendus du jugement du premier degré du procès¹¹⁸, les accusés n'avaient pas été condamnés pour n'avoir pas prévu le séisme mais pour des négligences dans l'estimation du risque et dans sa communication à la population (Billi 2013). Plus précisément, l'accusation d'avoir rassuré la population sur la nature inoffensive de la séquence sismique en cours avait été retenue. Le juge instructeur chargé de cette affaire a écrit que « *si [...] le tremblement de terre en tant que phénomène naturel n'est pas évitable, et si les connaissances actuelles ne permettent pas d'émettre des alertes de fortes secousses imminentes, l'évaluation correcte de prévisibilité du risque (que les inculpés n'ont pas fournie) et l'information complète en ce sens (que les inculpés n'ont pas fourni) auraient évité, ou auraient contribué à éviter, les décès et les blessures de personnes [...], elles en auraient en tout cas réduit le nombre* » (Ibid., p.246, trad. M.H.).

Afin de comprendre le contexte auquel ce jugement se réfère, les événements principaux qui y sont considérés sont résumés chronologiquement ci-après, selon trois phases distinctes (Ciccozzi 2013) : la période avant la réunion du comité CGR (phase 1), la phase immédiatement après cette réunion (phase 2) et le moment du tremblement de terre du 6 avril 2009 (phase 3).

114 Verdict émis le 22 octobre 2012 par le juge instructeur chargé de cette affaire judiciaire, Monsieur Marco Billi.

115 Verdict émis le 10 novembre 2014 par le président de la cour d'appel Madame Fabrizia Francabandera et les juges assessesurs Madame Carla De Matteis e Monsieur Marco Flamini.

116 Ce comité est dénommé CGR (*Commissione Nazionale per la Previsione e la Prevenzione dei Grandi Rischi*) et il a été créé en 2006 par le Président du Conseil des Ministres en tant qu'organisme institutionnel d'expertise technique scientifique du Département National de la Protection Civile, responsable, entre autres, de la communication du risque à la population.

117 Lors de la deuxième instance judiciaire, ces condamnations ont été considérablement modifiées : un membre du comité a été condamné à deux ans de prison pour blessures et homicide involontaire - l'ex chef adjoint du service technique opérationnel de la Protection Civile -, tandis que les autres six membres - des scientifiques et, en particulier, des sismologues - ont été tous acquittés.

118 Rapport rendu public en janvier 2013.

- Phase 1 : La séquence sismique et l'émergence d'un sentiment collectif d'inquiétude
L'intensification croissante de la séquence sismique en cours depuis plusieurs mois amena une inquiétude parmi la population. L'expérience directe de la longue séquence sismique, associée à la prise de conscience de plusieurs séismes destructeurs caractérisant l'histoire de la ville de L'Aquila, alimentèrent la représentation selon laquelle le phénomène en cours était à considérer comme un événement annonciateur d'une possible catastrophe. Ce sentiment collectif s'appuyait sur la convergence d'un constat - l'intensification de la séquence sismique - et d'une prévision par analogie - les circonstances étaient très semblables à celles ayant précédé les grands tremblements de terre du passé -. Ainsi, à l'occasion de la secousse sismique du 30 mars 2009, nombreuses personnes suivirent les consignes dictées par la culture populaire, indiquant qu'après une forte secousse, il fallait sortir de la maison et attendre quelques heures à l'extérieur.
- Phase 2 : La réunion du comité CGR du 31 mars 2009 et le diagnostic institutionnel
Le séisme du 30 mars 2009 amena la Protection Civile à organiser pour le lendemain une réunion extraordinaire du comité CGR, pour effectuer un diagnostic de la situation. Tout de suite après la réunion, le communiqué fourni par le chef adjoint du service technique opérationnel de la Protection Civile a été diffusé à la population au travers les médias locaux. Ce communiqué soutenait que les secousses de la séquence sismique en cours, comme celle du 30 mars 2009, correspondaient à des événements « positifs » permettant de décharger l'énergie sismique accumulée au cours du temps : le diagnostic tel qu'il a été émis à la population était donc « favorable »¹¹⁹.
- Phase 3 : Les séismes des 5 et 6 avril 2009 et le nouveau comportement adopté par une partie de la population
Le 5 avril 2009, une première secousse d'une durée de 5 seconds toucha à 22h48 la région autour la ville de L'Aquila, une deuxième à 00h39. À ces occasions, des milliers de personnes restèrent dans leur habitation en négligeant le comportement traditionnel de précaution adopté jusque là. Trois heures plus tard, à 3h32, la secousse la plus violente de la séquence sismique eut lieu en provoquant le décès d'environ 300 personnes.

Avec le verdict émis en première instance, le juge a accepté la thèse avancée dans l'acte d'accusation de l'existence d'un lien de causalité entre le communiqué diffusé après la réunion du comité CGR du 31 mars 2009 et les comportements de 29 personnes décédées à l'occasion de la principale secousse sismique, le 6 avril. Ce lien aurait encouragé certaines d'entre elles à rester dans leur habitation malgré les deux fortes secousses ayant eu lieu quelques heures auparavant, car elles avaient été rassurées par le communiqué.

Présenté dans le cadre du procès par les deux substituts du procureur de la République, ce lien de causalité trouve son argumentation théorique dans une expertise technique d'anthropologie culturelle, effectuée par l'anthropologue Dr. Antonello Ciccozzi. En effet, les substituts du procureur se sont rendus compte que, pour saisir pleinement le contexte en question, il était nécessaire d'enquêter sur le lien entre la « *communication institutionnelle* » et les « *comportements individuels* » ; ceci afin de déterminer l'influence exercée par le communiqué émis suite à la réunion du comité CGR sur la « *culture anthropologique du lieu* » (Ciccozzi 2013). Celle-ci est comprise comme l'« *ensemble des modèles qui décrivent les situations (modèles de réalité) et des modèles qui prescrivent les comportements (modèles pour la réalité)* » (Ibid., p.81, trad. M.H.), où les modèles descriptifs ont souvent tendance à devenir des modèles prescriptifs.

¹¹⁹ Dans l'entretien diffusé par les médias, le chef adjoint de la Protection Civile affirma qu'il s'agissait d'« *une situation favorable car il y [avait] un déchargement continu d'énergie* » (trad. M.H.). À ce sujet, il faut préciser que bien que des secousses de puissance faible ou modérée déchargent l'énergie sismique, l'interprétation que celles-ci diminuent la probabilité d'un séisme majeur n'est pas validée et elle n'est pas considérée comme véridique par les milieux scientifiques. À l'égard de cet entretien, on peut aussi noter que bien qu'il ait été diffusé après la réunion du comité CGR, il a été réalisé auparavant.

L'expertise technique conduite dans le cadre de ce procès s'est basée sur la théorie, admise en anthropologie culturelle, selon laquelle la vulnérabilité sociale peut augmenter ou se réduire en fonction de la perception du risque (Oliver-Smith 1996; Wisner et al. 2004; Ligi 2009). Les effets d'un agent destructeur sur une communauté seraient, en effet, déterminés par quatre variables, dont une se rapporte à la perception culturelle du risque¹²⁰. Qu'il s'agisse d'une perception du risque déclarée ou, au contraire, implicite et spontanée, elles assumeraient toutes deux un rôle primaire dans la détermination de la nature et des modalités des agissements individuels et/ou collectifs (Ligi 2009).

Sur la base de cette formulation théorique, l'auteur de l'expertise a énoncé le fondement logique de l'acte d'accusation de la manière suivante : étant donné que de nombreuses victimes ont fait confiance au communiqué diffusé après la réunion du comité CGR du 31 mars 2009, et que ceci a diminué la perception culturelle du risque, le diagnostic émis est à considérer en tant qu'agent destructeur car il a augmenté la vulnérabilité sociale (Ciccozzi 2013).

5.3.2. FACTEURS À L'ORIGINE DES COMPORTEMENTS INDIVIDUELS FACE AUX SECOURSSES SISMIQUES

Dans l'optique de mieux appréhender les dynamiques susceptibles d'agir sur la vulnérabilité sociale d'un milieu, comme celui précédent au séisme de 6 avril 2009 à L'Aquila, il est utile de se pencher sur certains des aspects décrits dans l'expertise technique d'anthropologie culturelle.

Ci-après, on présente, de manière succincte, la façon selon laquelle le communiqué institutionnel aurait été assimilé dans la culture anthropologique du lieu, ainsi que les modalités selon lesquelles ce même communiqué aurait déterminé les comportements des individus.

DES « MILIEUX INSTITUTIONNELS » AU « SENS COMMUN »

Le diagnostic diffusé suite à la réunion du comité CGR aurait conduit à un sentiment de sécurité par un processus de rationalisation des secousses sismiques en cours qui exhortait à une permutation du sens attribué au « *signal naturel* ». Un signal qui traditionnellement évoquait un « *état d'alerte* » serait devenu un signal indiquant une « *situation sûre* », car le risque d'un éventuel séisme destructeur se réduisait de séisme en séisme. Ce changement du sens attribué aux secousses sismiques aurait ainsi favorisé la « *normalisation* » du « *perturbant* » (Ciccozzi 2013).

Le contenu de ce diagnostic se serait diffusé au sein de la population comme étant un élément important dans le « *sens commun* ». Compris comme « *forme pratique de savoir* », le sens commun est élaboré « *au travers d'une dialectique continue entre pensée officielle, institutionnelle et pensée populaire, spontanée, folklorique* » (Ibid., p.84, trad. M.H.) et permet le « *décodage du monde* » qui guide la pratique de tous les jours. Par ce fait, il peut exercer une influence sur les comportements humains. L'assimilation du diagnostic institutionnel dans la culture anthropologique du lieu se serait, donc, produite par le biais d'une représentation sociale¹²¹ indiquant la nature inoffensive des secousses en cours.

¹²⁰ La *pseudo équation* (Ligi 2009) de cette formulation théorique est $D = I \times V = I \times (Ra - Rm \pm Rp)$, où :

D = Niveau de destruction

I = Agent d'impact physique (caractéristiques du tremblement de terre)

V = Niveau de vulnérabilité sociale (aspects sociaux se référant au domaine technique, politique, économique et culturel) déterminé en fonction des variables anthropiques suivantes :

Ra = Fonction d'amplification du risque (facteurs qui tendent à augmenter l'exposition au risque)

Rm = Fonction mitigative du risque (facteurs qui tendent à réduire l'exposition au risque)

Rp = Fonction de perception du risque (facteurs anthropologiques rapportés à la perception)

¹²¹ Les représentations sociales sont considérées comme « *une forme de sens commun* » (Ciccozzi 2013). Elles se constituent au regard d'« *objets, personnes, événements [...] spécialement dans les moments dans lesquels ceux-ci émergent au sein d'un groupe donné en tant que nouveauté* » et leur force est de « *rendre conventionnel ce qui est étranger à la dimension quotidienne [...] en l'insérant au sein d'un système de significations qui le rend familier* » (Ibid., p.85, trad. M.H.). La théorie des représentations sociales a été formulée par le psychologue social Serge Moscovici (Fischer 1987).

Par l'intégration de cette représentation sociale « *rassurante* » dans la culture anthropologique du lieu, un nouveau sentiment de quiétude se serait substitué à une pratique de précaution. Plus précisément, le modèle descriptif selon lequel les secousses en cours réduisaient la probabilité d'un séisme destructeur se serait traduit en un modèle prescriptif indiquant qu'il n'était pas nécessaire de sortir des habitations. Ce changement dans les sentiments de nombreuses personnes aurait été davantage stimulé par le fait que le nouveau modèle descriptif permettait de « *se relâcher un peu* » après des semaines d'angoisse ; les secousses sismiques auraient alors perdu leur sens traditionnel beaucoup plus rapidement, et avec moins de résistance, que dans une situation de normalité.

Les spécificités de l'environnement social, au sein duquel le diagnostic du comité CGR a été diffusé, auraient également assumé un rôle déterminant dans ce processus de transformation du niveau de perception du risque au sein de la population. Déjà avant la réunion du comité CGR, l'interprétation de la séquence sismique en tant que phénomène déchargeant l'énergie avait été évoquée dans certains communiqués transmis par les médias. Ces communiqués auraient eu un effet non négligeable sur la propension de la collectivité à assimiler la représentation rassurante diffusée à l'occasion de la réunion. Ils auraient facilité la pénétration de cette représentation dans le sens commun, en agissant en tant qu'élément de support à sa plausibilité, et ils auraient favorisé ainsi sa sédimentation dans le « *subconscient collectif* » au sein de la population locale (Ibid.).

DU « SENS COMMUN » AUX « ENCYCLOPÉDIES INDIVIDUELLES »

La représentation diffusée n'aurait, toutefois, pas eu la même influence sur le comportement des individus. Dans les processus individuels de décision du « *code interprétatif* » à adopter, « *la même représentation sociale n'a jamais capacité égale de persuasion à l'égard de tous les habitants d'un lieu* ». Son assimilation par les habitants de la province de L'Aquila aurait dépendu des modalités de transposition de la représentation, du niveau de « *sens commun* » à celui des « *encyclopédies individuelles* »¹²², en fonction du degré de sensibilité et de confiance des individus dans la source originelle des renseignements : les institutions publiques ou la culture populaire (Ibid.).

Parmi les personnes confiantes dans les institutions, la contrainte psychologique à être cohérent avec les diagnostics émis par celles-ci serait devenue un élément de persuasion qui les a conduites à rester dans leurs habitations. En revanche, lorsque le sens attribué aux secousses coïncida avec l'interprétation populaire, le comportement conséquent fut de sortir des habitations car le risque d'un éventuel séisme destructeur, dans des brefs délais, serait augmenté après chaque secousse. Ceux qui ont opté, intentionnellement ou non, pour « *les coutumes de culture populaire sédimentées dans le subconscient collectif* », auraient de fait reçu avec méfiance et beaucoup de réserves les communiqués institutionnels, en les omettant dans la détermination de leurs actions (Ibid.).

5.3.3. PROCESSUS DE RATIONALISATION DU DOUBLE ÉVÉNEMENT « SÉISME + PROCÈS »

L'expertise technique d'anthropologie culturelle conduite par le Dr. Ciccozzi est une première au niveau mondiale, ce qui met en évidence l'exceptionnalité de cette intervention comme de la situation en relation à laquelle elle a été effectuée. Les faits qui y sont traités sont très complexes à interpréter ; ils soulèvent de nombreux questionnements auxquels il est parfois difficile de répondre avec certitude. Indépendamment du procès judiciaire, cette expertise représente une contribution essentielle en vue de davantage cerner les facteurs pouvant exercer une pression marquée sur la manière des collectivités et des individus de se rapporter au risque sismique, ainsi qu'afin de mieux comprendre leur interaction mutuelle.

¹²² La notion d' « *encyclopédies individuelles* » renvoie à l'idée que « *toute personne compose son propre répertoire culturel, en le structurant dans un propre récit subjectif qui tend à être unitaire, à partir des répertoires culturels ainsi que des récits socialement disponibles, en les adoptant, en les niant, en les réélabrant, en les mélangeant, en les interprétant ; c'est-à-dire, en les utilisant comme des éléments pour déterminer sa propre vision du monde et de la vie qui lui permet de penser son existence matérielle et symbolique, en l'inscrivant d'une manière particulière dans un environnement de significations partagées* » (Ciccozzi 2013, p.80-81, trad. M.H.).

Notamment, un des aspects significatifs à retenir de cette expertise est le niveau d'influence variable des représentations populaires et institutionnelles du risque, sur les comportements adoptés par les individus ; ce qui rend explicite dans quelle mesure les « savoirs empiriques constitués » peuvent encore aujourd'hui agir sur le niveau de vulnérabilité sociale. Celui-ci ne dépendrait pas uniquement des savoirs officiellement reconnus et généralement diffusés par les organes en charge de la protection civile, mais également de la dimension comportementale des cultures locales du risque qui se sont développées au fil des siècles.

Au-delà des éléments d'ordre anthropologique introduits dans ce chapitre, le cas de L'Aquila permet également de mettre en exergue certains aspects généraux qui se rapportent, de manière plus large, aux enjeux liés à la gestion du risque sismique.

Premièrement, le cas de L'Aquila est représentatif de l'importance de rendre intelligibles tous les phénomènes sociétaux susceptibles d'augmenter la vulnérabilité d'un milieu humain et, en particulier, de ceux dont la vraie dangerosité est difficilement reconnaissable. Un tel effort est crucial car, ne pas pouvoir définir un phénomène, amplifie la probabilité d'en subir à nouveau les conséquences, en l'avenir. Ainsi, dans le cadre de l'expertise d'anthropologie, une notion spécifique a été formulée par son auteur pour décrire l'« action de rassurer quelqu'un » qui se trouve en danger par la diffusion d'une information erronée. Cette notion, indiquée en italien avec le terme *rassicurazionismo*, permet de qualifier une situation dans laquelle une prédiction rassurante est introduite en dépit du danger¹²³ (Ciccozzi 2013).

Deuxièmement, l'expertise de Ciccozzi contient une leçon de portée générale et offre une opportunité de comprendre de manière plus systématique et sérieuse la responsabilité des institutions publiques et scientifiques en matière de gestion du risque. Bien que l'analyse et l'évaluation des risques auxquels une société est exposée doivent incontestablement se fonder sur des données quantitatives relatives aux phénomènes potentiellement destructeurs, la culture anthropologique des lieux menacés devrait être prise en considération dans la définition des modalités selon lesquelles les renseignements relatifs au risque estimé sont communiqués à la population.

De nombreuses lettres ouvertes rédigées par des institutions scientifiques, du monde entier, affirment que la sentence de première instance judiciaire représente un verdict portant atteinte à la liberté de diffusion des résultats scientifiques, ce qui témoigne au fait d'une confusion à propos de la thèse centrale de l'acte d'accusation, voire d'un certain niveau de « corporatisme » (Stengers 2013). En effet, celle-ci ne fait aucune mention des influences éventuelles des recherches scientifiques publiées, sur les attitudes et sur les comportements adoptés par les individus. L'expertise d'anthropologie en question a, de fait, analysé exclusivement l'impact de communiqués fournis par un organisme institutionnel chargé de la communication du risque, dont une de ses missions correspondait effectivement à agir sur la perception du risque au sein de la population.

Troisièmement, la compréhension du niveau d'incidence d'un comité d'experts sur les décisions des autorités nécessite une prise en compte approfondie du processus d'élaboration du « *jugement collectivement construit* », c'est-à-dire des modalités suivies pour déterminer une opinion collective (Woo 2011). En effet, une « *représentation convergente du risque* » n'est généralement pas toujours facile à élaborer, en raison de « *visions du monde divergentes* » qui peuvent subsister parmi les différents spécialistes (techniciens, académiques, chercheurs, scientifiques, politiciens) et qui exercent une forte pression « *sur la manière de rapporter le risque à la société civile et politique* » (Miranda 2006, p.159). Dans de telles circonstances, le rôle des représentants des organismes institutionnels en charge de la protection de la population devient crucial car, en principe, ils sont les responsables premiers de la communication de ce jugement collectif aux personnes concernées.

¹²³ Cette notion (*rassicurazionismo*) s'ajoute ainsi aux deux autres déjà couramment employées dans la gestion et la communication du risque : la notion d'« échec dans l'alerte », qui se réfère à l'absence d'informations préventives en présence de risque, et la notion de « fausse alerte », relative à la diffusion d'une information alarmiste en absence de risque (Ciccozzi 2013).

Finalement, le double événement « séisme + procès » propre au cas de L'Aquila peut être compris dans deux sens.

D'abord, il constitue un moment soulignant la nécessité, en matière de gestion du risque, de renforcer le lien entre l'ensemble des différents acteurs composant une collectivité, notamment les institutions publiques, les comités d'experts et la société civile.

D'autre part, il représente un événement qui met en lumière l'importance d'incorporer les cultures locales du risque, également celles d'origine ancienne, aux activités de prévention, afin qu'elles puissent continuer à concourir à la résilience des milieux menacés par des aléas naturels ; ceci en prenant en compte tant leur dimension constructive que comportementale.

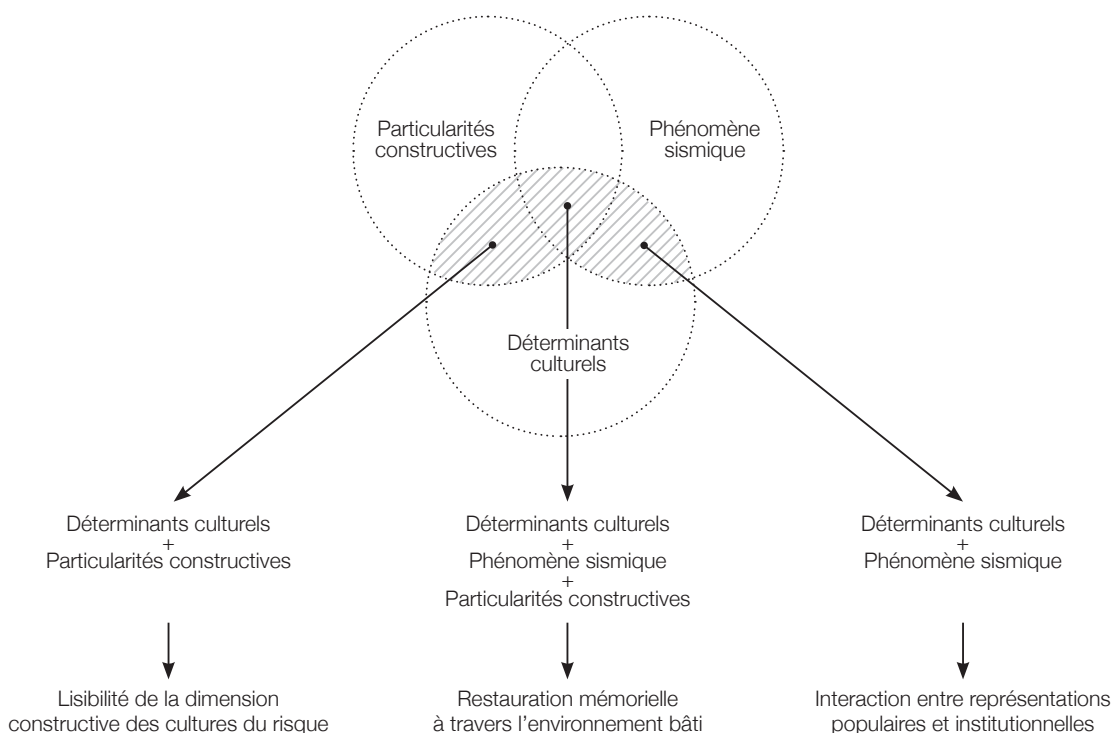
SYNTHÈSE

6. RECONNAÎTRE LES DÉTERMINANTS CULTURELS PARASISMIQUES

Ce dernier chapitre se propose de formuler des remarques de synthèse en se référant à la thématique principale traitée dans cette partie : les aspects d'ordre culturel exerçant une incidence sur les comportements individuels et collectifs face au phénomène sismique (« déterminants culturels »). Ces considérations sont mises en lien direct avec les deux autres sujets examinés dans l'étude de cas : les caractéristiques du bâti ancien (« particularités constructives ») et les grands tremblements de terre historiques et récents (« phénomène sismique ») (tab.4) :

- l'interdépendance entre la visibilité des particularités constructives augmentant la résistance sismique du bâti et la connaissance populaire à l'égard de leur apport structurel dégage l'importance de l'intelligibilité de la dimension constructive d'une culture du risque ;
- les dynamiques avec lesquelles les comportements humains face aux phénomènes sismiques se constituent, aussi bien en situation ordinaire qu'au cours d'un événement particulier, révèlent l'influence conjointe des représentations populaires et institutionnelles du risque sur la vulnérabilité sociale ;
- la constatation que certaines particularités de l'environnement construit peuvent stimuler un processus de restauration mémorielle des stratégies de protection mises en œuvre dans le passé, souligne en quelle mesure elles contribuent à l'accroissement de la sensibilité sismique de la population.

Ces trois aspects sont exposés de manière approfondie ci-après, afin de préciser les intérêts présentés par une reconnaissance et une valorisation des « déterminants culturels parasismiques », c'est-à-dire des facteurs d'ordre culturel qui contribuent à la résilience des sociétés.



Tab.4 Schéma de synthèse des aspects se rapportant aux trois domaines d'analyses considérés.

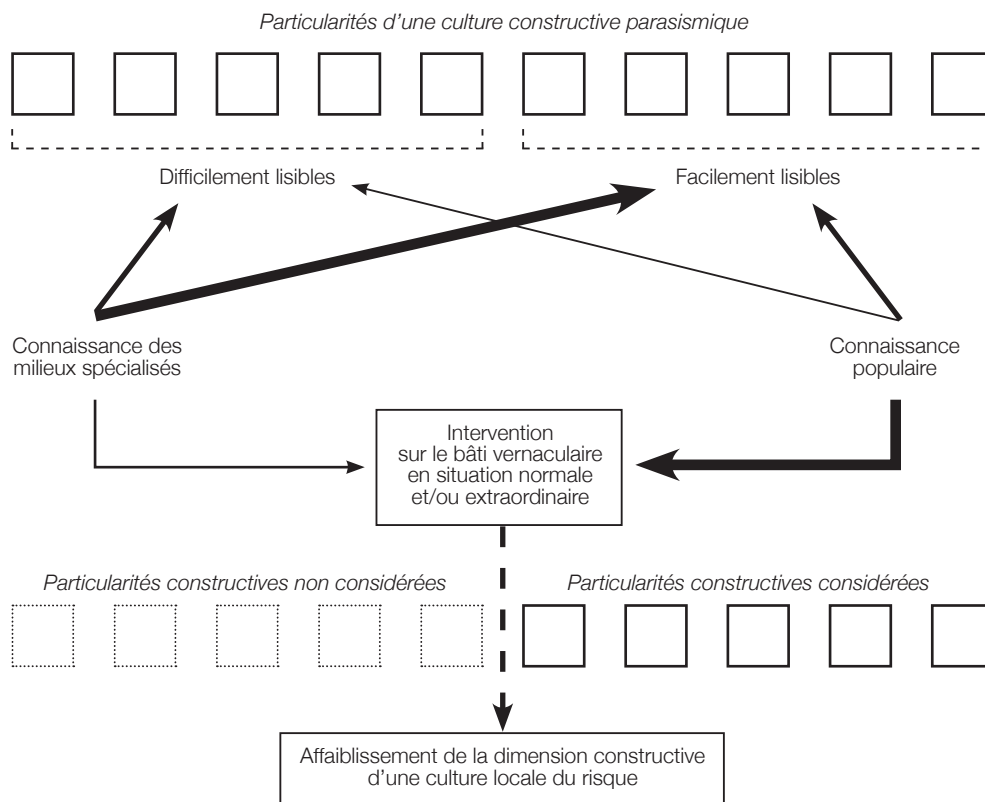
6.1. LISIBILITÉ DE LA DIMENSION CONSTRUCTIVE DES CULTURES DU RISQUE

Le bâti vernaculaire est étroitement lié à la culture du lieu ; certaines de ses particularités constituent très vraisemblablement la dimension constructive d'une culture locale du risque. Par exemple, à l'occasion du séisme de L'Aquila de 2009, l'effondrement global de nombreux bâtiments a pu être évité grâce à la présence de certaines astuces constructives, développées et mises en oeuvre par les bâtisseurs du passé. Toutefois, ce savoir n'étant plus transmis, son apport effectif n'est pas toujours connu. La reconnaissance des particularités constructives susceptibles d'avoir été élaborées pour augmenter la résistance des ouvrages a donc lieu principalement par l'étude des environnements bâtis endommagés par des événements sismiques. Ce processus de redécouverte est pour le moment limité principalement aux milieux spécialisés ; la connaissance populaire à ce sujet dépend surtout du niveau de lisibilité de la dimension constructive des cultures du risque, ainsi que des associations qui peuvent être faites entre les caractéristiques architecturales des lieux et leur historique sismique.

La visibilité des particularités améliorant la résistance des constructions assume, par conséquent, un rôle indirect double sur la détermination à long terme de la vulnérabilité d'un milieu.

D'un côté, la nature des interventions contemporaines entreprises sur le bâti en situation normale ainsi qu'après un tremblement de terre dépend non seulement du degré de connaissance des constructeurs, mais aussi de celui des habitants. Bien que ceci soit vrai surtout pour des travaux ponctuels et de dimension réduite ne touchant pas forcément à l'ensemble du système structurel d'un bâtiment, leur incidence sur sa résistance peut être considérable. Ainsi, l'impact de ce type d'interventions sur le niveau de vulnérabilité d'un environnement bâti peut être quantitativement étendu et qualitativement très important, s'il est compris dans sa globalité.

D'autre part, l'omission des caractéristiques améliorant la résistance sismique du bâti vernaculaire affaiblit la richesse intrinsèque à la culture locale du risque. Au fil du temps, le nombre de ces particularités constructives est susceptible de se réduire, en amoindrissant ainsi encore davantage le subtil lien que la population peut tisser avec le caractère parasismique des cultures constructives vernaculaires.

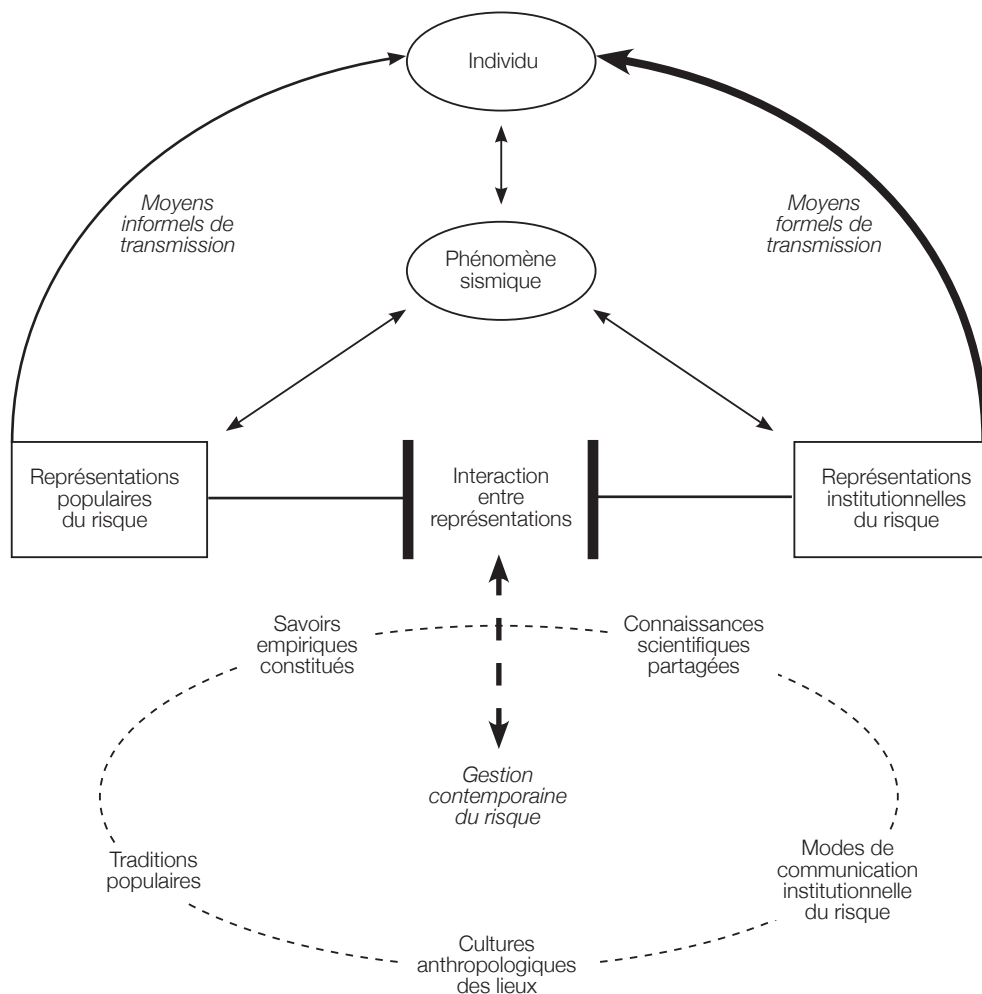


Tab.5 Schéma de l'implication que peut avoir l'illisibilité des particularités constructives parasismiques dans l'affaiblissement, sur le long terme, d'une culture locale du risque.

6.2. INTERACTION ENTRE REPRÉSENTATIONS POPULAIRES ET INSTITUTIONNELLES

Les renseignements se référant au phénomène sismique qui exercent une pression accrue sur la manière des individus de s'y rapporter sont nombreux. Au sein des sociétés contemporaines, ceux-ci se partagent en deux modalités principales. Les savoirs traditionnels diffusés de manière horizontale et extensive par le biais de moyens informels (milieux domestiques, espaces publics, etc.) s'entrelacent aux renseignements propagés verticalement au travers des systèmes institutionnalisés, notamment par le biais de la communication officielle du risque. La nature de l'interaction entre la pensée populaire - basée sur des perceptions et des jugements de nature intuitive - et la pensée scientifique - élaborée principalement à partir de données quantitatives - est dialectiquement liée à ces dynamiques sociétales.

La détermination des comportements individuels face au danger est largement influencée par les institutions publiques : l'autorité qu'elles représentent amplifie leur niveau d'action sur la perception du risque au sein de la population. En devenant partie intégrante du savoir de sens commun, les représentations institutionnelles du risque se substituent, au fil du temps, aux savoirs empiriques constitués, en induisant un affaiblissement de la dimension comportementale des cultures du risque « anciennes ». Compte tenu du rôle considérable que les attitudes précautionneuses intrinsèques à celles-ci peuvent encore jouer de nos jours dans la protection de la population, l'interaction entre les représentations populaires et institutionnelles du risque doit être reconnue et optimisée. Notamment, l'ancrage des traditions populaires et des cultures anthropologiques des lieux à la gestion contemporaine du risque se révèle souvent nécessaire en vue de parvenir à une réduction maximale de la vulnérabilité sociale des milieux humains.



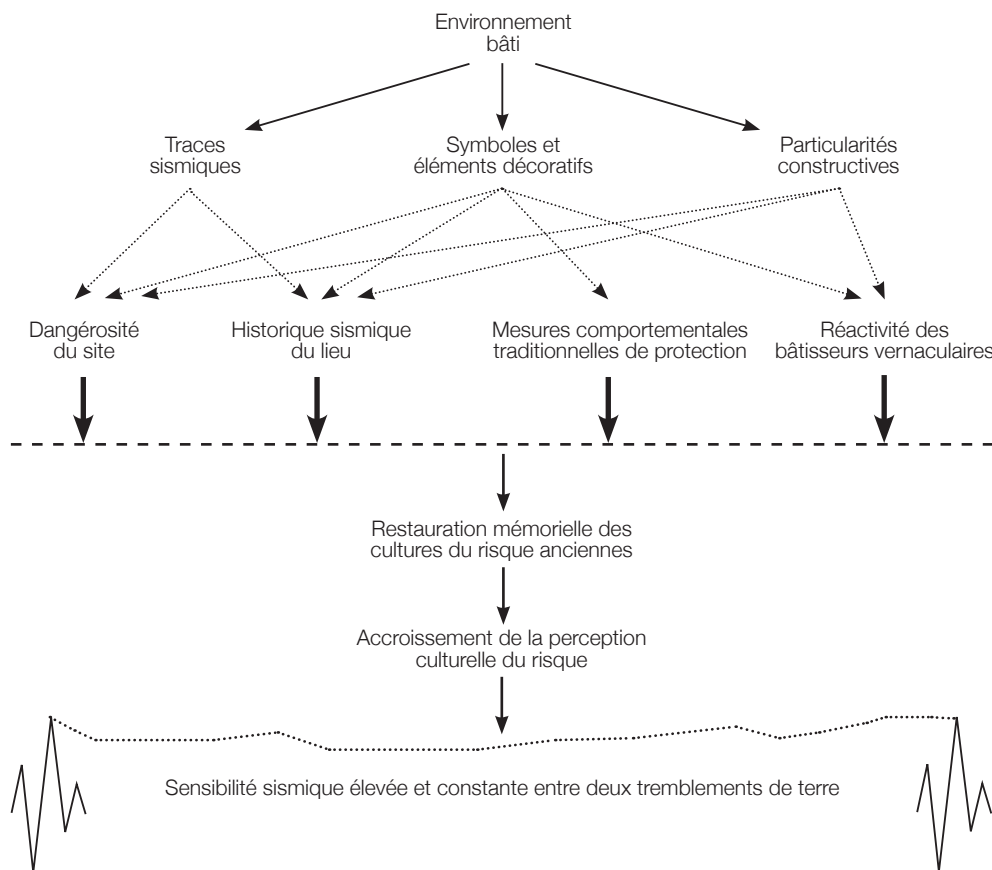
Tab.6 Schéma de l'interaction entre les représentations populaires et institutionnelles du risque, mentionnant les aspects que la gestion contemporaine du risque pourrait intégrer en vue de son optimisation.

6.3. RESTAURATION MÉMORIELLE À TRAVERS L'ENVIRONNEMENT BÂTI

Dans les lieux historiquement concernés par les phénomènes sismiques, l'environnement bâti se caractérise par des éléments qui renvoient directement à la dangerosité du site. Celle-ci est intelligible notamment dans les traces laissées par les tremblements de terre ayant eu lieu au fil du temps, par exemple, les bâtiments endommagés qui n'ont pas été démolis et/ou les monuments érigés en souvenir des victimes.

Certaines caractéristiques du bâti peuvent également témoigner des stratégies de protection élaborées au cours des siècles. Le contenu sémantique associé à certains symboles (comme les fleurs de lys des ancras de façade des tirants dans la ville de L'Aquila) évoque l'histoire sismique du lieu ; par ce fait, ils peuvent rappeler les attitudes et les comportements précautionneux qui se sont révélés efficaces dans le passé pour réduire le niveau d'exposition de la population au risque. Ou encore, les raisons à l'origine des particularités constructives qui renvoient de manière explicite au phénomène sismique (comme les contreforts adossés aux maçonneries fragilisées ou les tirants connectant les murs orthogonaux) remémorent la réactivité des bâtisseurs vernaculaires en évoquant ainsi l'ensemble des mesures constructives, de prévention et/ou de réparation, qu'ils ont adoptées.

Tous ces éléments spécifiques aux environnements bâtis et renvoyant, d'une manière ou d'une autre, aux tremblements de terre assument une fonction particulièrement importante dans la détermination de la résilience des milieux. Par un processus de restauration mémorielle des cultures du risque qui se sont développées dans le passé, ils permettent de renforcer, de manière constante, la perception du risque au sein de la population et donc de limiter la tendance à l'affaiblissement de sa sensibilité sismique dans le long terme. Cet aspect est fondamental pour que les agissements humains prenant en compte les phénomènes sismiques soient favorisés non seulement après leur impact mais également en situation ordinaire, notamment pendant les phases entre deux grands tremblements de terre.



Tab.7 Schéma synthétisant les facteurs principaux qui stimulent le raffermissement de la sensibilité sismique des populations, entre deux tremblements de terre.

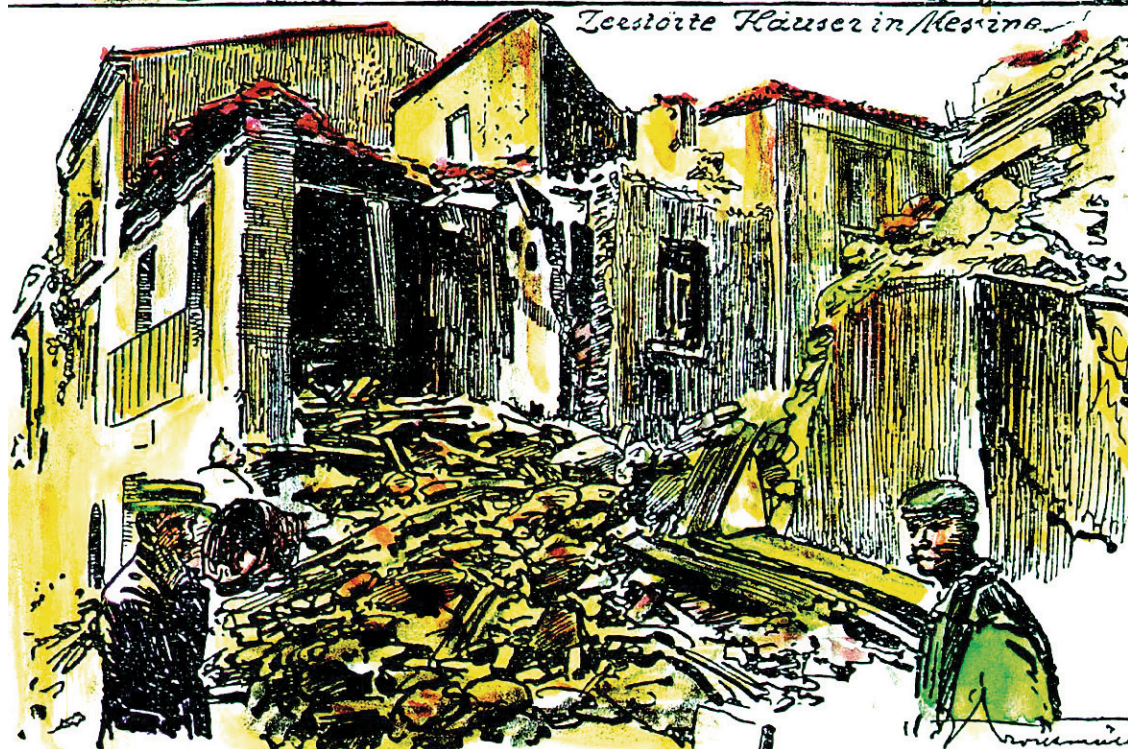


Fig.40 Tremblement de terre ayant affecté les Calabres (Italie) en 1908 : croquis réalisés par le sismologue allemand August Sieberg en 1908 (Source : Kozák et Cermák 2010).

Partie II : Types de structures parasismiques

INTRODUCTION DE LA PARTIE II

Les cultures du risque qui se sont développées au cours des siècles dans les régions assujetties aux phénomènes sismiques sont imprégnées de stratégies de gestion, d'atténuation et d'anticipation des risques. Elles se rapportent, en effet, à des comportements et attitudes visant une diminution de la vulnérabilité sociale ainsi qu'à des mesures constructives qui préviennent l'écroulement des ouvrages et/ou limitent la mise en danger des habitants. Lors d'un événement sismique, la destruction du bâti représente, de fait, la cause principale de dérèglement au sein des milieux humains affectés. Sa bonne performance devient ainsi essentielle afin de minimiser le nombre de victimes comme pour limiter les répercussions néfastes qui peuvent découler dans les tissus sociaux et sur le plan économique.

La corrélation entre le bâti vernaculaire et le *facteur séisme* est approfondie, dans cette partie, par une analyse typologique des architectures qui ont démontré, au cours d'événements historiques, une bonne performance, dans l'optique d'en dégager les particularités qui les différencient, ou qui ont en commun, ainsi que les caractéristiques spécifiques à l'origine de leur bon comportement dynamique.

L'intention de cette analyse est double. D'un côté, il s'agit de mettre en évidence les facteurs d'ordre constructif qui contribuent à améliorer la capacité des architectures vernaculaires à résister à des sollicitations horizontales, en vue de leur appréciation et prise en compte. D'autre côté, il s'agit d'explorer les modalités d'identification des solutions à caractère parasismique présentes au sein des cultures constructives, en vue de leur reconnaissance et d'une valorisation des qualités intrinsèques aux environnements bâtis anciens.

ENTRE APPROCHES ET PARTICULARITÉS

1. ARCHITECTURES VERNACULAIRES AYANT RÉSISTÉ AUX SÉISMES

1.1. APPROCHES CONSTRUCTIVES

Au XVIII^e siècle, les tremblements de terre étaient comparés à une « *une sorte de fluide* » envahissant toute chose (Michele Sarconi dans Placanica 1985). De manière semblable, trois siècles plus tard, ils sont considérés comme « *une bouffée d'énergie qui frappe la structure* » (Lestuzzi 2008). L'utilisation de telles métaphores est représentative de la nature très complexe du phénomène sismique, dont une des caractéristiques primaires est l'imprévisibilité des mouvements, ainsi que de la difficulté à déchiffrer ses effets sur un objet quelconque (Coburn & Spence 1992).

Soumis à des secousses, tout être vivant ou artefact en contact avec le sol est perturbé : les sollicitations sismiques horizontales et verticales, agissant de manière cyclique et dynamique, vont s'additionner aux forces à la base de son équilibre statique en situation ordinaire. Bien que les accélérations sismiques transmises par le sol puissent se produire dans toute direction, les plus puissantes ont généralement lieu suivant une orientation horizontale dominante (Lang 2002). Dans un bâtiment, elles engendrent des forces d'inertie¹²⁴ qui peuvent se révéler très destructrices, selon les caractéristiques du tremblement de terre¹²⁵ mais également en fonction des particularités propre à l'ouvrage et de son comportement pendant les secousses¹²⁶ (Ferrigni et al. 2005). En fait, le type de structure, les matériaux employés ainsi que les détails constructifs, assument de concert un rôle décisif dans la manière dont un bâtiment répond à des sollicitations (Lestuzzi 2008).

Dans les régions historiquement touchées par des tremblements de terre, nombreuses sont les stratégies mises en œuvre pour cohabiter avec le risque, de l'échelle du territoire à celle de l'habitat.

Le choix du site d'implantation se réfère, certes à la proximité de ressources naturelles garantissant la subsistance ou à une position stratégique au point de vue militaire ou économique, mais il a souvent été également influencé par des facteurs de sécurité face au phénomène sismique. En fait, plusieurs exemples laissent à penser que les communautés du passé sembleraient avoir pris en compte le type de sol et la morphologie du terrain des lieux où elles se sont installées (Ferrigni et al. 2005), et cela afin de réduire le plus possible le risque que des conditions locales défavorables puissent amplifier les secousses sismiques, en raison de l'effet de site¹²⁷.

À l'échelle de l'habitat, les bâtisseurs ont mis en œuvre de nombreuses mesures pour garantir une sécurité structurale à l'ouvrage ou, au moins, pour diminuer le danger auquel ses occupants étaient exposés. Dans certains cas, ces mesures témoignent que d'authentiques stratégies de réduction de la vulnérabilité imprègnent le concept architectural de base, car, de fait, elles influencent de manière significative la configuration des ouvrages, notamment, leur forme, dimension, hauteur ainsi que leur matérialité. Des types d'architectures particuliers peuvent effectivement être rapportés à des approches constructives

¹²⁴ Les forces d'inertie qui se génèrent au sein d'une structure dépendent de sa masse et de l'accélération sismique, selon l'équation suivante : Forces d'inertie = Masse de la structure x Accélération sismique (Balandier 2004).

¹²⁵ Les caractéristiques d'un tremblement de terre peuvent être rapportées aux paramètres suivants : l'accélération maximale du sol (se référant au mouvement du sol dans un site donné), le type de mouvement du sol (qui dépend de la nature du terrain), la durée des secousses ainsi que leur fréquence (Ferrigni et al. 2005).

¹²⁶ Une structure est un système qui possède une période propre d'oscillation et qui, en fonction de ses caractéristiques, peut amplifier ou atténuer les sollicitations sismiques (Balandier 2004).

¹²⁷ L'effet de site ayant le plus d'impact sur le bâti découle de la présence de couches superficielles de sol meuble car les ondes sismiques y restent piégées et rebondissent en se renforçant. Avec des sols meubles, les oscillations de périodes longues s'amplifient, tandis que sur les sites rocheux ce sont celles de périodes courtes qui sont augmentées. Une variation de puissance des oscillations peut aussi résulter de la morphologie du terrain : sur les reliefs convexes, tel que sur une crête sommitale, les mouvements du sol sont amplifiés, alors qu'ils sont atténués dans les reliefs concaves, comme au pied des arêtes rocheuses raides (Balandier 2004).

parasismiques distinctes, se différenciant par la diverse façon dont les bâtisseurs sembleraient avoir réagi aux forces induites par des sollicitations horizontales. Trois approches conceptuelles spécifiques sont, ci-dessous, présentées en référence à des ouvrages architecturaux qui en sont représentatifs.

1.1.1. ATTACHEMENT AU SOL

Avec l'approche de l' « attachement au sol », l'occupation du bâtiment au sol est le concept architectural de base. Cette approche constructive vise à une optimisation de la stabilisation latérale : les poussées horizontales d'un tremblement de terre sont contrecarrées par la conformation trapue du système porteur, ainsi que par son poids propre, accru par l'utilisation de matériaux particulièrement lourds (Ferrigni et al. 2005).

L'architecture de certaines églises réalisées pendant la colonisation espagnole aux Philippines (entre les XVI^e et XVIII^e siècles) manifestent de manière très explicite l'intérêt d'une telle approche en zone sismique. De fait, elles constituent le résultat d'un processus d'adaptation de l'architecture baroque européenne aux contraintes environnementales locales¹²⁸. La destruction pour cause d'évènements sismiques des premiers bâtiments religieux commandités par les colonisateurs a conduit à revoir la manière de les édifier : la hauteur a été réduite, l'épaisseur des murs agrandie, des contreforts ponctuels en pierre ont été adossés aux murs et des matériaux plus légers ont été employés pour les étages supérieurs. L'église de Saint Agustín (dans le Nord de l'île de Luzon), voulue par les missionnaires Augustins espagnols et construite entre 1694 et 1710, illustre très bien cette évolution (fig.41). Avec son plan très compact, sa hauteur réduite et ses vingt-quatre contreforts, cet ensemble architectural assume un aspect qui démontre l'intention claire de l'attacher au sol par le biais de choix cohérents en relation à la forme et à la matière.

La capacité de cette église à contrecarrer efficacement les secousses sismiques est attestée par le fait qu'elle a résisté pendant trois siècles à de nombreux tremblements de terre. Par ailleurs, le terme anglais « *Earthquake Baroque* » (Rantucci 1994) est aujourd'hui employé pour définir le style de ce type d'églises éparpillées sur le territoire philippin : ce même qualificatif est également utilisé pour indiquer des bâtiments semblables qui sont présents dans d'autres régions sismiques du monde ayant été assujetties à une colonisation européenne, notamment en Amérique Latine.



Fig.41 Attachement au sol : Façade principale de l'église de Saint Agustín (a) et ses contreforts ponctuels (b), Paoay, Philippines (Source : Eazytraveler) ; c) Schéma : stabilité latérale accrue.

¹²⁸ Source : site internet de l'UNESCO, accessible à l'adresse www.unesco.org.

1.1.2. DÉTACHEMENT DU SOL

Apporter de la masse à une construction peut la sauvegarder de sa destruction, néanmoins, bâtir une structure suffisamment massive pour qu'elle puisse résister à des secousses n'est pas toujours possible et/ou convenable, en raison de l'importante quantité de matériaux que cette approche constructive requiert. En effet, si on confie la résistance sismique à la masse du bâtiment, celle-ci devra être très grande car les forces d'inertie auxquelles il doit faire face sont particulièrement élevées.

À l'opposée de cette approche constructive, il y a celle qui permet d'éviter la génération de forces d'inertie dans la structure en raison de son « détachement du sol » ; dans ce cas, le concept de base est celui de l'isolation sismique. La bonne performance des bâtiments ainsi réalisés est garantie par une dissipation partielle, voire totale, de l'énergie sismique, favorisée par les mouvements qui ont lieu à l'interface entre la superstructure et la partie directement en contact avec le terrain, soit le soubassement ou les fondations.

Datant de plusieurs centaines d'années, les architectures vernaculaires caractéristiques de la province de Gilan, dans l'Iran septentrional, en constituent un cas exemplaire (fig.42). Entre la superstructure en bois et le soubassement en terre, une surélévation pouvant mesurer de quelques dizaines de centimètres à 1.5 mètres est réalisée avec des piliers composés par des petits rondins superposés les uns sur les autres de manière alternée (Bromberger 1974; Rainer 1977). Bien que la protection de la maison contre l'humidité et l'action des rongeurs représente souvent la raison principale ayant amené les bâtisseurs à surélever la partie habitée, elle n'est pas forcément la seule. Un tel système d'appuis en rondins superposés peut être effectivement perçu comme l'aboutissement d'une approche constructive qui correspond au principe à l'origine de la technique parasismique contemporaine de l'isolation sismique¹²⁹ (Qubādiyān 2007; Naderzadeh 2009). De fait, à l'occasion du tremblements de terre de Manjil de 1990 (M 7.4), certaines des architectures de la région iranienne du delta (Lahijan) se sont déplacées de 15-20 cm, sans pourtant subir des dégâts structuraux (Naderzadeh 2009).



Fig.42 Détachement du sol : a) Schéma : déplacement latéral ; Habitations (b,c) et appuis en rondins (d,e,f,g) typiques de la province de Gilan, Iran (Crédits : b,e,g, Grodwhol ; c, Khansari et Yavari ; d, Rainer ; f, Qubādiyān).

129 L'idée à l'origine de la technique de l'isolation sismique est de séparer la superstructure du sol « afin de la préserver des mouvements sismiques » en intégrant des appuis « dont la rigidité horizontale est nettement plus faible que celle de la structure sus-jacente » et « conçus pour pouvoir absorber d'importants déplacements » (Lestuzzi & Badoux 2008, p.111). En cas d'événement sismique, les déplacements se concentrent ainsi en correspondance des appuis et la superstructure peut se déplacer comme un seul bloc sans subir des dégâts.

1.1.3. RUPTURE LOCALE MAÎTRISÉE

Les bâtisseurs vernaculaires non seulement ont élaboré et mis en œuvre des solutions très efficaces pour éviter ou limiter les dégâts sur le bâti mais, dans certains cas, ils sont également parvenus à augmenter la protection des habitants en acceptant un certain degré de rupture de l'ensemble bâti, notamment dans les contextes exposés à des séismes particulièrement violents. L'approche constructive adoptée relève du concept de « rupture locale maîtrisée », compris comme le démantèlement partiel prévu de la structure.

Des exemples représentatifs de cette approche sont les architectures vernaculaires en bois et bambou de l'île de Nias (Sumatra) en Indonésie (fig.43; Gruber 2007). La manière dont leur ensemble structurel est réalisée favorise, en fait, un démantèlement inoffensif des maisons en combinant efficacement les propriétés structurelles d'un ensemble flexible, qui peut bouger, à celle d'une structure rigide, indéformable. Ainsi, lors du tremblement de terre de Nias ayant eu lieu en 2005 (M 8.7), aucune victime n'a été déplorée parmi les habitants de ces architectures. Ceci a été rendu possible par une tripartition structurelle dans le plan vertical (surélévation, partie habitée et toiture) et par l'absence d'éléments continus allant du sol au sommet. Dans un tel cas de figure, les diagonales en bois de l'ossature de la surélévation assurent seulement une résistance limitée. Ainsi, lors d'un événement sismique de puissance particulièrement élevée, il se produit un basculement de la partie habitée située au-dessus qui reste, toutefois, intacte grâce à l'action rigidifiant des parois qui la composent¹³⁰.



Fig.43 Rupture locale maîtrisée : Construction caractéristique de la région méridionale de île de Nias avant (a) et après (b) le séisme de 2005, Indonésie (Crédits : Wolff) ; c) Surélévation en bois dans un bâtiment de la région septentrionale de Nias (Crédit : Pudjisyuradi) ; d) Schéma : basculement de la partie supérieure.

¹³⁰ En fait, les planches en bois constituant les parois non seulement ont une importante épaisseur mais, de plus, elles sont glissées dans des rainures présentes dans les montants du système porteur vertical, ce qui assure une rigidité accrue à la partie habitée, qui fonctionne ainsi comme une boîte rigide.

1.2. TYPOLOGIE DES SYSTÈMES PORTEURS VERTICAUX

Les trois approches constructives présentées précédemment mettent bien en évidence le lien étroit qui peut subsister entre les stratégies adoptées pour réduire la vulnérabilité du bâti, ainsi que celle de ses habitants, et les traits typiques des ouvrages. Toutefois, elles ne représentent pas les seules solutions qui ont été élaborées par les bâtisseurs du passé. Il existe de nombreux autres types de structures vernaculaires ayant résisté à des événements sismiques mais qui, en raison de leurs propriétés, ne peuvent pas être associées à une approche constructive distincte. Nombreuses sont les architectures vernaculaires dont la bonne performance sismique ne repose pas sur un concept architectural de base ; elle résulte plutôt de la manière singulière selon laquelle le système porteur vertical a été réalisé.

Afin de saisir les caractéristiques propres aux systèmes porteurs verticaux qui se sont avérés être résistants aux tremblements de terre, ce chapitre s'intéresse au bâti vernaculaire des régions sismiques le long de la chaîne alpino-himalayenne ; ce vaste territoire s'étendant le long de la faille méridionale de la plaque eurasiatique, de l'Afrique du Nord jusqu'à l'Asie du Sud, en passant par les Apennins, les Alpes et l'Himalaya.

Dans ces régions, le bois, la pierre et la terre crue, constituent les matériaux qui ont été le plus couramment employés par les bâtisseurs vernaculaires. Bien que les environnements bâtis actuels peuvent se caractériser par des structures édifiées avec un seul matériau, entièrement réalisées en matière minérale (pierre ou terre crue) ou végétale (bois ou bambou), on peut également en identifier certaines qui ont été réalisées en combinant plusieurs matériaux. Parmi celles-ci, nombreuses ont démontré à maintes reprises une très bonne performance sismique ; elles sont, ci-après, présentées en les regroupant en des types de structures distincts en fonction de leur système porteur vertical.

Les spécificités qui les distinguent sont décrites en faisant référence à la manière dont le bois est utilisé structurellement. Ce choix découle de l'intérêt de tracer un trait d'union entre les divers types de structures, de manière à mettre en évidence les principales similitudes et/ou divergences d'ordre constructif.

En outre, les régions où ces différents types de structures ont été mis en œuvre sont indiquées pour montrer leur diffusion géographique. Des renseignements relatifs à des tremblements de terre particuliers ou à des événements d'ordre historique sont également apportés afin de saisir certaines des raisons ayant pu stimuler leur développement et propagation.



Fig.44 Architectures vernaculaires après des tremblements de terre : a) Habitation en ossature bois à côté d'un immeuble en ossature de béton armé renversé par le séisme de Kocaeli de 1999 (M 7.4), Turquie (Crédit : EEFIT) ; b) Bâtiment de deux étages en maçonnerie en briques de terre crue se situant exactement en correspondance de la rupture du terrain qui s'est produite à l'occasion du séisme de Gediz (Turquie) de 1970 (M 6.9), dont le déplacement vertical a été d'environ 50 cm (Crédit : Aytun).

TYPE 1_MAÇONNERIE AVEC INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS NOYÉES DANS LA MASSE

Ce premier type de structure se caractérise par des éléments en bois intégrés dans le sens horizontal au milieu de la section des murs en maçonnerie de pierre, principalement en moellons. Ces éléments correspondent, dans la plupart des cas, à des rondins en bois écorcés d'environ 15 cm de diamètre, parfois équarris. Aux extrémités, ils sont généralement connectés à des pièces métalliques qui se prolongent au travers la section du mur orthogonal et qui sont reliées à des ancrages de façade ; rares sont les cas où aucun élément métallique n'a été employé. Leur emplacement dans le plan vertical du mur est très variable : avec un intervalle régulier (environ 1 mètre) ou uniquement dans des endroits spécifiques, notamment aux niveaux du plancher, de la toiture et du linteau.

Ce type de mur était très répandu dans l'architecture byzantine à partir du V^e siècle (Kelley et al. 2000) ; plus récemment, il a été documenté en Tunisie¹³¹, dans les régions des Balkans et de l'Anatolie (Sherdenkovska 2011) ainsi qu'en Italie (Decanini et al. 2004; D'Antonio 2013). Dans ce dernier pays, son adoption daterait au moins de l'époque des grands tremblements de terre des XIV^e et XV^e siècles ayant affecté les régions centrales et méridionales, en particulier dans le Molise et les Abruzzes. La diffusion territoriale de cette pratique constructive est très difficile à saisir dans sa globalité en raison de la difficulté à identifier la présence d'éléments en bois noyés dans les murs, sans effectuer des analyses de type destructif.

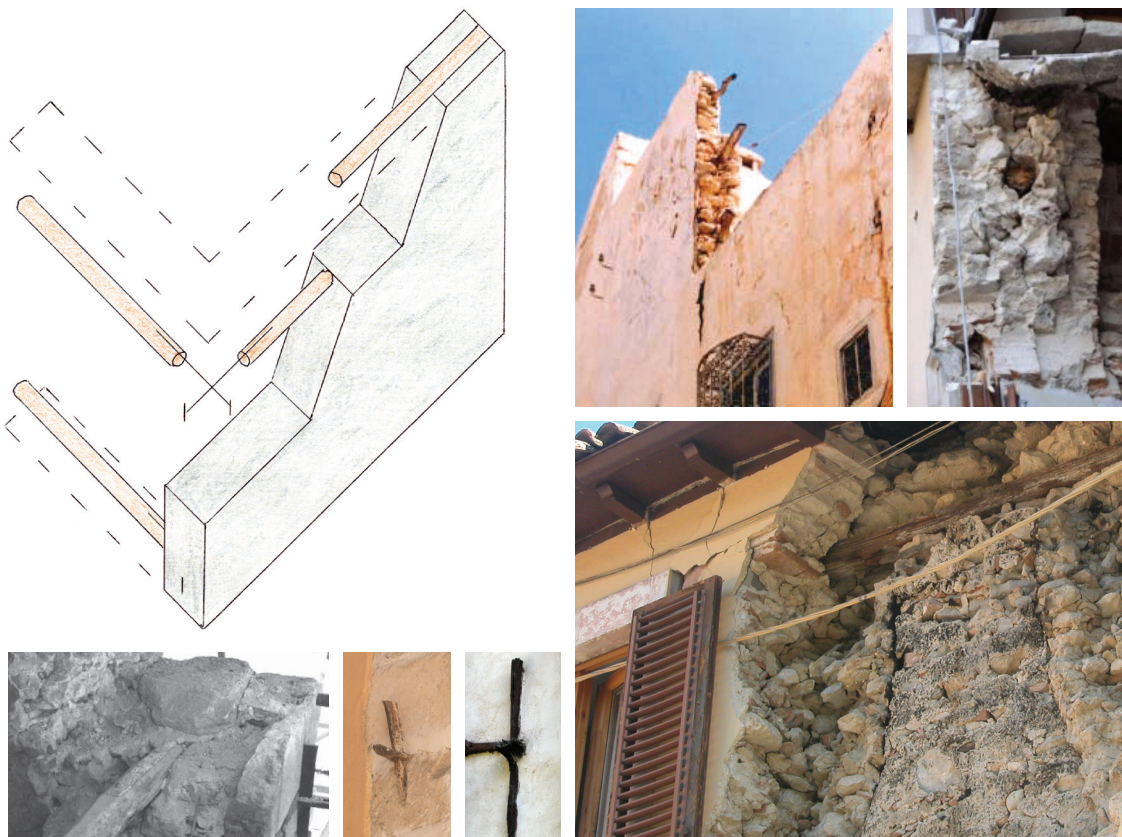


Fig.45 Insertions horizontales noyées dans la masse : a) Axonométrie de la variante avec pièces métalliques ; b) Tunisie (Crédit : Meda Corpus) ; Rondin dans la section du mur (c, Crédit : Borri) et au niveau du linteau (d), L'Aquila, Italie ; Détails de l'intersection de deux murs perpendiculaires (e, Crédit : D'Antonio) et des ancrages de façade métallique (f) et en bois (g).

131 Source : site internet du projet de recherche dénommé *Meda Corpus* consacré à l'architecture vernaculaire des zones méditerranéennes, accessible à l'adresse www.meda-corpus.net.

TYPE 2_MAÇONNERIE AVEC INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS EN FORME D'ÉCHELLE

Les bâtiments correspondant à ce type de structure se particularisent par la présence de longs tasseaux en bois intégrés horizontalement dans les deux côtés d'un mur en maçonnerie, généralement en moellons ou en briques de terre crue, d'épaisseur variable entre 40 et 60 cm. Tout le long du mur, ces tasseaux longitudinaux sont connectés régulièrement entre eux par le biais de petites traverses disposées, dans la plupart des cas, au-dessus¹³². Au final, l'élément en bois se caractérise par une conformation semblable à celle d'une échelle disposée horizontalement. Ceci est généralement introduit aux niveaux du plancher, de la toiture, du linteau et de l'appui des fenêtres ; dans les murs où leur nombre est supérieur, ils sont disposés avec un intervalle vertical régulier. La section des tasseaux de bois composant ces insertions en forme d'échelle peut être carrée ou rectangulaire, d'une dimension variable entre 8 et 15 cm.

Des bâtiments très anciens existent au Pakistan (Hughes 2000), dont un exemple est le complexe nommé Mohenjo Daro datant de 3500 avant J.-C, et en Anatolie centrale (Hughes 2005), où cette pratique semblerait avoir été adoptée il y a 9000 ans, déjà. Aujourd'hui, le niveau de diffusion de ce procédé constructif particulier au sein du bâti vernaculaire est très variable d'un pays à l'autre. Parmi ceux où il est très répandu, on retrouve le Pakistan (Schacher 2008c), l'Inde (Hughes 2005), la Turquie (Diskaya 2006), la Grèce (Kizis 1977) et la Macédoine (Sumanov 2003). Dans ce dernier pays, nombreuses sont les maisons en maçonnerie de brique de terre crue de 3-4 étages du village de Cucer Sandevo qui ont survécu au grand tremblement de terre de 1963 (M 6) ayant eu lieu à seulement 8 km de distance (Sumanov 1990) ; un événement sismique qui, d'ailleurs, provoqua la destruction d'une grande partie des bâtiments de la capitale Skopje. Des architectures correspondant à ce type sont également présentes, mais avec une fréquence moindre, en Arménie (Mkrtchyan 2000), au Maroc, en Algérie et en Syrie¹³³. Il est intéressant de préciser que l'Italie est le seul pays à forte sismicité (parmi ceux situés le long de la chaîne alpino-himalayenne) où des bâtiments avec de tels murs n'ont pas été identifiés dans la documentation consultée.

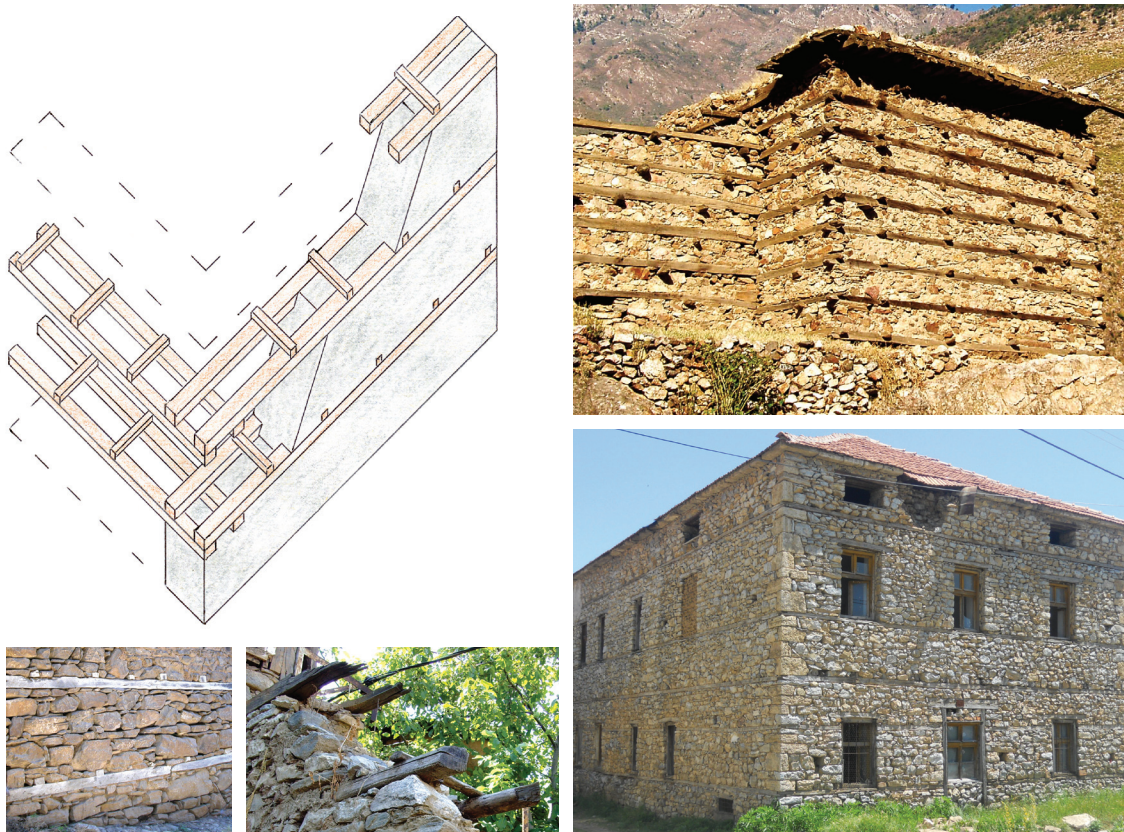


Fig.46 Insertions horizontales en forme d'échelle : a) Axonométrie ; b) Besham Fort, Pakistan (Crédit : Schacher) ; c) Immeuble d'habitation, Beltchichta, Macédoine ; d,e) Détails des échelles, Cumalkızık, Turquie.

¹³² Mis à part des cas plutôt rares où les traverses sont placées au-dessous des éléments longitudinaux, comme dans certaines constructions dans le Pakistan septentrional.

¹³³ Source : www.meda-corpus.net.

TYPE 3_PILERS AVEC INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS EN FORME D'ÉCHELLE AU NIVEAU DES PLANCHERS

Dans ce type de structure, deux aspects varient par rapport au précédent : l'emplacement des éléments horizontaux en bois dans le plan vertical du mur et la nature du système porteur vertical. Les insertions horizontales en forme d'échelle sont disposées exclusivement au niveau des planchers et le système porteur vertical est constitué de piliers en maçonnerie de pierre, dissimulés derrière un parement de brique. Ces piliers ont une section d'environ 50 cm et se distancient d'approximativement 120 cm ; les travées sont occupées par des baies vitrées ou par des murs de faible épaisseur (20 cm) en briques de terre cuite.

Au Cachemire indien, seule région où des architectures correspondant à ce type de structure ont été identifiées (Shah & Tayyibji 2008; Langenbach 2009), le terme employé pour les désigner (*Taq*) se rapporte à l'aspect modulaire de leurs murs qui, de fait, les différencient des autres bâtiments : une maison appelée *5-Taq* est une maison avec 5 baies. Par ailleurs, cette modularité évoque un facteur d'ordre pragmatique qui particularise davantage ce procédé constructif de celui, présenté auparavant, où les insertions horizontales sont intégrées à des systèmes porteurs continus : grâce au fait que les planchers et la toiture s'appuient sur des piliers, l'ouvrage peut être mis sous couvert avant même l'achèvement de l'ensemble des murs extérieurs.

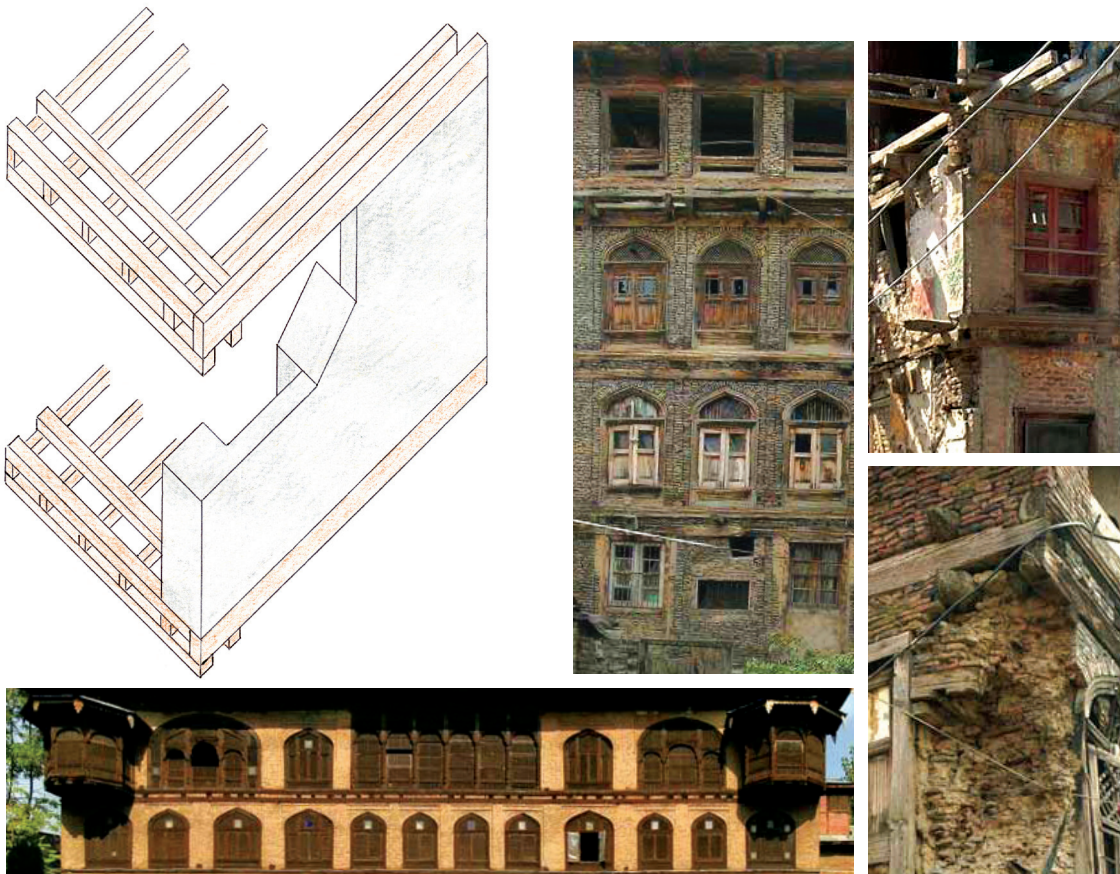


Fig.47 Insertions horizontales en forme d'échelle au niveau des planchers : a) Axonométrie ; b) Bâtiment de quatre niveaux, Srinagar, Etat de Jammu-et-Cachemire, Inde ; c,d) Connexions entre les échelles et les solives du plancher ; e) Façade représentative de la modularité propre à ce type de structure (Crédits : Langenbach).

TYPE 4_ MAÇONNERIE AVEC INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS OCCUPANT TOUTE LA SECTION MURALE

Dans les constructions qui correspondent à ce type, les éléments horizontaux en bois occupent, à la différence des cas précédents, toute la section du mur en maçonnerie. Pour ce faire, les bâtisseurs ont employé des planches en bois, dans la plupart des cas d'épaisseur d'environ 3 cm, ou des rondins de 10-15 cm de diamètre, et ils les ont disposés longitudinalement l'un à côté de l'autre, avec un espacement vertical entre 80 et 150 cm. Généralement, les murs se composent de pierres ou de briques en terre crue ou cuite, leur épaisseur mesure entre 40-60 cm et le mortier employé est en terre crue ou à la chaux.

L'emploi de planches en bois a été identifié en Turquie (cf. partie II, étude de cas), alors que la version avec des rondins en bois est une singularité des bâtiments composant l'ancienne citadelle de la ville d'Alger (Abdessemed Foufa & Benouar 2008). Ici, le nombre de rondins est généralement de trois et, dans certains cas, ils sont disposés uniquement à l'intersection de murs orthogonaux, en se prolongeant jusqu'à 2 mètres de distance depuis l'angle¹³⁴. Dans certains ouvrages, tels que le Palais du Dey, ils sont également employés dans l'articulation entre les colonnes des portiques et les arcs, en correspondance du chapiteau¹³⁵ (Abdessemed Foufa & Benouar 2006 ; Rovero & Tonietti 2012). La récurrence de rondins en bois dans les murs des bâtiments de la ville d'Alger est à mettre en lien avec les prescriptions promues par son Gouverneur, le Dey Aly Chaouch, suite au tremblement de terre de 1716. Néanmoins, cette pratique constructive caractérise également des ouvrages situés en dehors de la région d'Alger, par exemple dans la ville de Miliana qui, d'ailleurs, avait été frappée par des événements sismiques seulement quelques années après, en 1724 (Abdessemed Foufa & Benouar 2010). Dans la région des Aurès, située dans le territoire Nord Est de l'Algérie, des branches transversales de petites dimensions (3 cm de diamètre) sont disposées au-dessous des rondins¹³⁶, ce qui dévoile l'existence de variantes constructives spécifiques qui se sont développées à une échelle locale.

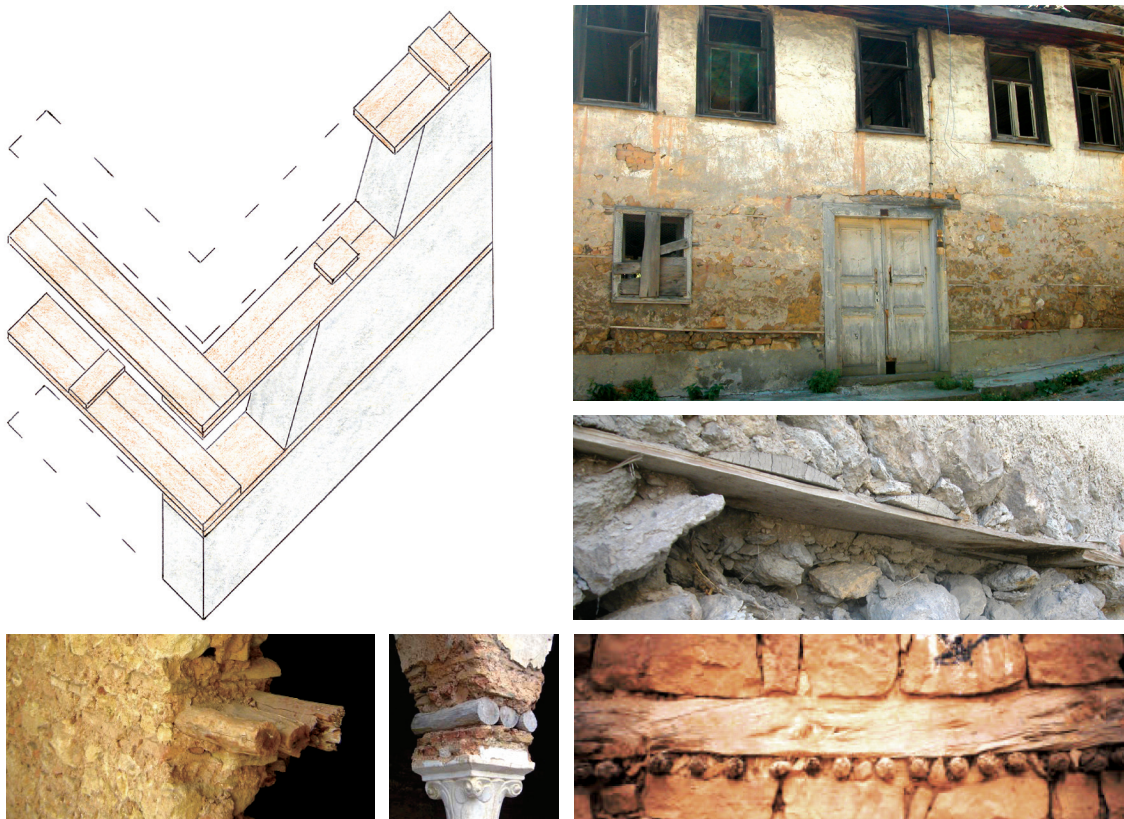


Fig.48 Insertions horizontales traversant la section murale : a) Axonométrie de la variante avec planches ; Planches dans des bâtiments à Kastamonu (b) et à Safranbolu (c), Turquie ; Trois rondins dans le mur (d) et entre colonne et arcs (e) à Alger, Algérie (Crédits : Abdessemed Foufa et Benouar) ; f) Version avec branches transversales, région d'Aurès (Crédit : Meda Corpus).

134 Par rapport à cette particularité caractérisant certains bâtiments algériens où les rondins sont disposés uniquement aux intersections de murs, il est intéressant de noter la similitude avec un cas rencontré dans la ville de L'Aquila (Italie), où des éléments horizontaux en bois ont été découverts à ces mêmes endroits, lors de travaux de réparation post-séisme 2009.

135 Deux variantes : trois rondins sur deux assises de brique ou deux niveaux de rondins perpendiculaires sur une assise.

136 Source : www.meda-corpus.net.

TYPE 5_MAÇONNERIE DE FAIBLE ÉPAISSEUR AVEC INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS RAPPROCHÉES

Le système porteur vertical de ce type de structure présente trois caractéristiques différentes par rapport au type précédent : l'épaisseur du mur, la dimension des éléments horizontaux en bois ainsi que leur intervalle vertical. Les maçonneries composées de pierres et d'un mortier en terre crue ont une épaisseur de 20 cm et les éléments en bois, occupant toute la section du mur, ont une section rectangulaire relativement grande, d'environ 15 cm de hauteur. L'espacement vertical entre ces insertions est très réduit, approximativement 25 cm ; souvent, elles se superposent aux angles ; parfois, la liaison se fait par encastrement. Généralement, il y a des aiguilles verticales sur les deux côtés du mur qui sont fixées par le biais de pinces traversant le mur et, dans certains cas, il y a même des aiguilles qui percent les extrémités des éléments horizontaux en bois en les reliant ainsi entre eux, aux angles du bâtiment. À la différence des types de structures décrits auparavant, dans celui-ci, les parties en maçonnerie et celles en bois contribuent en égale mesure à la transmission des charges gravitationnelles.

Ce type de mur caractérise principalement l'architecture rurale de la région du Nuristan, en Afghanistan (Edelberg & Jones 1979; Wutt 1981; Edelberg 1984; Hughes 2005). Dans ces constructions, un système intérieur de poteaux est disposé au milieu des pièces et supporte les poutres de la toiture, constituant ainsi une structure porteuse supplémentaire qui contribue à la stabilité de l'ensemble bâti. Par ailleurs, la résistance de ces ouvrages à d'éventuelles poussés horizontales était testée pendant le chantier ; cela en sollicitant latéralement les murs à l'aide d'animaux.



Fig.49 Insertions horizontales rapprochées : a) Axonométrie de la variante avec encastrement aux angles ; Bâtiments avec aiguilles verticales dans la région du Nuristan, Afghanistan (b,c,d, Crédits : b, Jones, c, Wutt, d, Edelberg) et à Kharsali, Etat de l'Uttarakhand, Inde (e, Crédit : Hrish) ; f, g) Version sans aiguilles, mais avec encastrement des insertions aux angles, Kamdesh, Nuristan (Crédits : Edelberg).

TYPE 6_MAÇONNERIE ÉPAISSE AVEC INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS RAPPROCHÉES

De manière similaire au type de structure précédent, ici, les éléments horizontaux en bois sont très rapprochés les uns des autres, ils sont posés en alternance à des parties en maçonnerie. Ce qui diffère est l'épaisseur de la maçonnerie, beaucoup plus importante (entre 40 et 70 cm), le fait que les insertions en bois n'occupent pas toute la section murale (sauf celles situées près du sol), ainsi que leur dimension changeante en fonction de l'emplacement dans le plan vertical du mur. Elles sont généralement mises en œuvre en forme d'échelle ; les traverses ne sont pas visibles en façade car disposées entre les éléments longitudinaux. Néanmoins, dans les parties inférieures du bâtiment, les éléments en bois ont globalement une section plus importante. En outre, ils se superposent aux angles du bâtiment alors que, dans les parties supérieures, ils sont superposés exclusivement à des poutres perpendiculaires situées au milieu des façades qui relient entre eux les murs extérieurs parallèles.

Ce type de structure a été identifié dans les villages des hautes montagnes des vallées de l'Himalaya, notamment dans les Etats indiens de l'Uttarakhand, de l'Himachal Pradesh, ainsi que dans la région du Karakoram au Pakistan, en Afghanistan et au Népal (Saklani et al. 1999 ; Thakkar & Morrison 2008). L'appellation courante pour décrire ces architectures (*Koti Bana*) coïncide avec le nom d'un village de l'Uttarakhand où, d'ailleurs, il y a des constructions dont le bois a été daté d'environ 1'000 ans (Rautela & Joshi 2007, 2008; Rautela et al. 2008). D'après cette datation, celles-ci auraient donc survécu aux nombreux tremblements de terre qui ont affecté cette région au cours des derniers siècles, entre autres, ceux de Kumaun de 1720, de Garhwal de 1803 et de l'Himachal Pradesh de 1905. L'âge estimé des éléments en bois peut également amener à supposer que la diffusion régionale de ces architectures très singulières pourrait découler d'une réaction au séisme très violent qui a eu lieu en 1100 et dont, d'ailleurs, les secousses furent ressenties dans presque tout le sous-continent indien.



Fig.50 Insertions horizontales épaisses et rapprochées : a) Axonométrie ; b,c) Bâtiment à plusieurs niveaux dans l'Etat de l'Uttarakhand, Inde (Crédit : Rautela et Joshi) ; d) Tour dans la vallée de Dubair, Pakistan (Crédit : Schacher) ; Détails des traverses de connexion placées entre éléments séparés (e) ou adjacents (f) et de l'alternance entre insertions et maçonnerie en pierres de taille (g), Etat de l'Himachal Pradesh, Inde (Crédits : Thakkar et Morrison).

TYPE 7_MAÇONNERIE AVEC ÉLÉMENTS HORIZONTAUX EN BOIS SUPERPOSÉS EN FORME DE PILIER CREUX

Dans les architectures qui correspondent à ce type, les éléments horizontaux en bois sont intégrés à un mur en maçonnerie en moellons d'environ 40 cm d'épaisseur suivant deux procédés distincts.

Aux intersections de murs porteurs ainsi qu'aux angles du bâtiment, des paires de tasseaux en bois, de section d'environ 10 cm, sont superposées en sens alterné, de manière à composer un « pilier creux ». Ce procédé permet la réalisation d'éléments porteurs ponctuels qui sont, par la suite, remplis avec des cailloux et un mortier de terre. La structure en bois et le remplissage participent conjointement à la transmission des charges verticales et constituent une composition très stable : en fait, les unités maçonnées contreventent les éléments en bois tandis que ces derniers les retiennent en place.

Le deuxième procédé selon lequel des éléments horizontaux en bois sont introduits au sein des maçonneries se réfère à l'emploi de tasseaux longitudinaux semblables à ceux identifiés dans certains des types de structures présentés précédemment, se caractérisant par des insertions en forme d'échelle. Dans ce cas, il faut toutefois remarquer l'absence de traverses de connexion. Ces éléments longitudinaux sont disposés dans les deux côtés du mur et principalement aux niveaux du plancher, de la toiture, du linteau et de l'appui des fenêtres, permettant ainsi de relier régulièrement les « piliers » en bois situés ponctuellement le long du mur.

Dénommée *Cator and cribbage*, cette pratique est présente dans différentes régions de l'Himalaya, en particulier au Pakistan, dans le Nord de l'Inde, au Népal et au Tibet (Ferrigni et al. 2005; Hughes 2005). Bien qu'elle ait été adoptée pour la réalisation de bâtiments résidentiels et religieux, elle est surtout typique des ouvrages à caractère défensif. Au Pakistan, plusieurs forts sont ainsi réalisés, entre autres, le *Altit* datant d'au moins 1000 ans, le *Baltit* âgé de 700 ans et le *Nilt* (Bianca 2005; Bianca et al. 2005). Les murs de ce dernier ont été même décrits comme indestructibles par les cadres de l'armée britannique au cours d'une campagne militaire en 1891 : les canons n'avaient aucun effet (Hughes 2000). Par ailleurs, il semblerait qu'Alexandre le Grand (356 - 323 av. J.-C.) ait aussi fait usage de ce procédé constructif lors de ses expéditions en Asie. En fait, il offre des avantages considérables sur le plan de la mise en œuvre : il permet de monter rapidement en hauteur, de construire sur des terrains accidentés, de réaliser des murs relativement minces et d'employer des moellons de forme et taille hétéroclites.

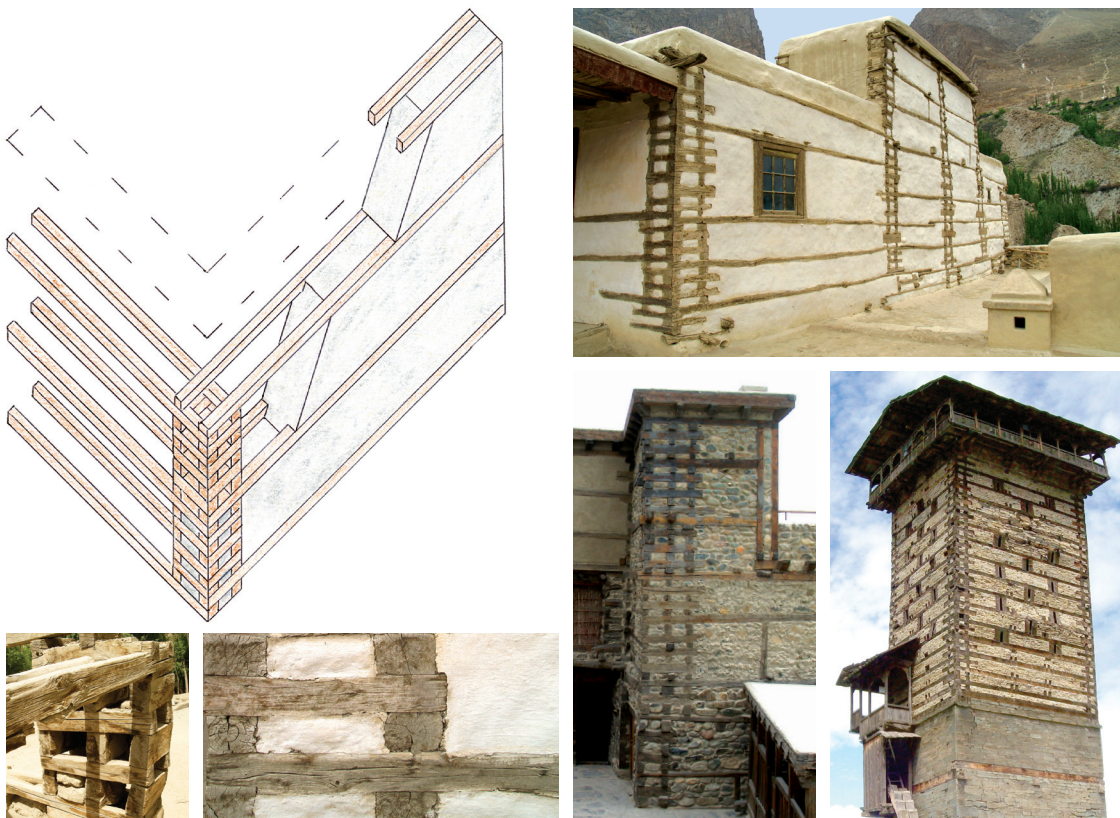


Fig.51 Eléments superposés en forme de « pilier creux » : a) Axonométrie ; Forts à Hunza (b) et à Shigar (c) et détails constructifs (e,f), Pakistan (Crédits : Schacher) ; d) Tour à Chaini, Etat de l'Himachal Pradesh, Inde (Source : wikipedia).

TYPE 8_MAÇONNERIE AVEC ÉLÉMENTS HORIZONTAUX ET VERTICAUX EN BOIS

L'aspect le plus significatif qui distingue ce type de structure des autres décrits auparavant réside dans le fait que les éléments en bois sont intégrés dans les murs non seulement dans le sens horizontal mais également dans le sens vertical. Plus précisément, les éléments verticaux sont disposés au moins là où, dans le type précédent, des paires de tasseaux étaient superposées pour former un système porteur vertical ponctuel. Généralement, des montants sont situés aux intersections de murs, aux angles du bâtiment ainsi qu'à côté des ouvertures, ou suivant plutôt une trame régulière, alors que des tasseaux longitudinaux les connectent aux niveaux du plancher, de la toiture et, parfois, même en correspondance du linteau. Bien que la transmission des charges gravitationnelles soit assurée principalement par les murs en maçonnerie, les éléments en bois y participent également : leur présence devient cruciale surtout en cas de déstabilisation de la maçonnerie, car ils évitent l'écroulement des planchers et du toit.

Des murs de ce type ont été découverts lors de fouilles archéologiques en Crète, dans plusieurs sites occupés pendant la civilisation minoenne (2700-1200 av. J.-C.), ainsi que dans le quartier d'Akrotiri de Théra sur l'île de Santorin, au Sud de la Grèce, détruit par une éruption volcanique au XVI^e siècle av. J.-C. (Touliatos 1993; Tsakanika-Theohari 2009). Dans ce deuxième site, le charbon trouvé dans de nombreuses cavités au sein des murs en maçonnerie du palais de Cnossos (datant d'environ 3400 ans) est considéré comme étant la preuve tangible que des éléments en bois très épais, jusqu'à 30 cm de côté, y étaient régulièrement incorporés (Stiros 1995). Des constructions semblables existent également dans d'autres pays. En Turquie, les éléments en bois sont toutefois moins épais, ils mesurent environ 10 cm d'épaisseur (cf. partie II, étude de cas) alors qu'en Chine (Liu et al. 2006) et en Italie, et plus précisément dans certains bâtiments réalisés au début du XVIII^e siècle dans la ville de L'Aquila (très vraisemblablement après le grand séisme de 1703), les insertions correspondent souvent à des troncs écorcés (D'Antonio 2013).

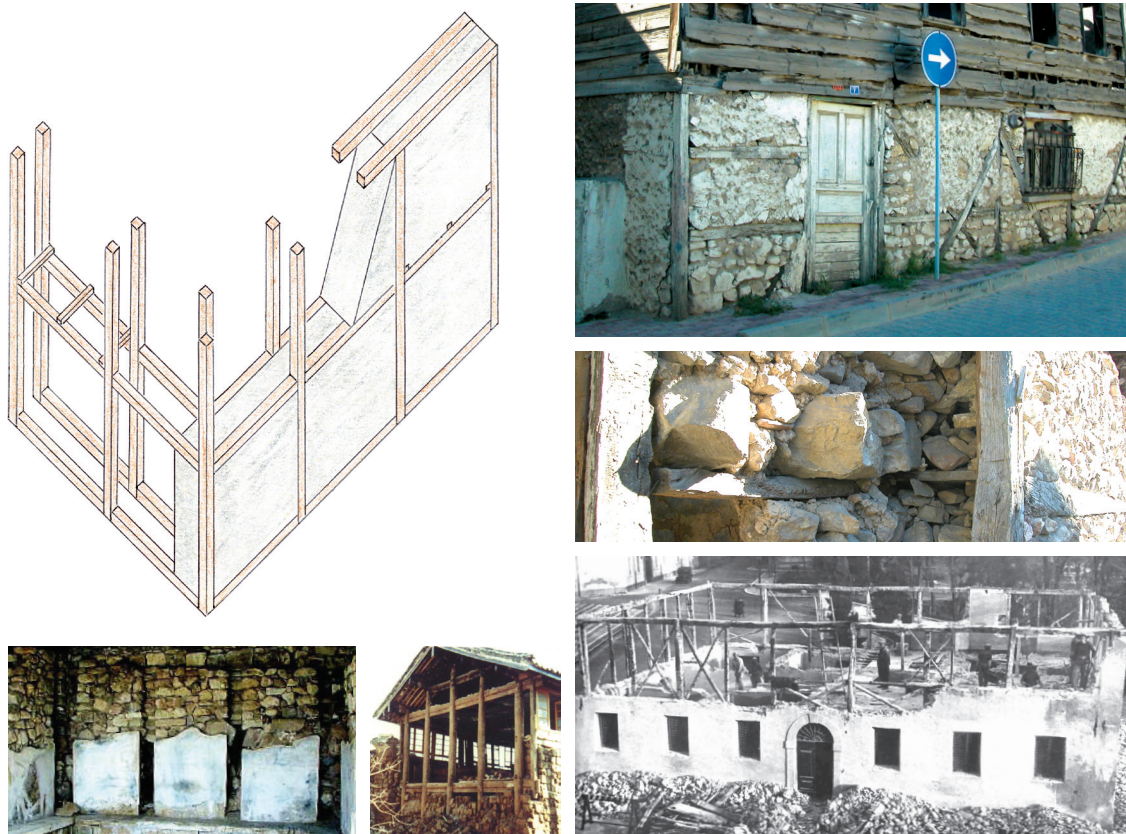


Fig.52 Insertions horizontales et verticales : a) Axonométrie de la variante avec montants vers l'intérieur et l'extérieur ; Mur du rez-de-chaussée (b) et détail (c), Tavşancıl, Turquie ; d) Immeuble du XVIII^e siècle, L'Aquila, Italie (Source : D'Antonio 2013) ; e) Construction minoenne, Crète, Grèce (Crédit : Tsakanika-Theohari) ; f) Structure à Lijiang, Chine (Source : Liu et al. 2006).

TYPE 9_ SYSTÈME À POTEAUX-POUTRES EN BOIS ASSOCIÉ À DES MURS EN MAÇONNERIE

Avec ce type, les éléments en bois ne sont plus intégrés au mur, mais ils constituent une structure porteuse poteaux-poutres indépendante, totalement séparée des maçonneries : en fait, les bâtiments présentent un double système porteur vertical. Des poteaux en bois très épais sont disposés, avec un entraxe mesurant entre 2 et 3 mètres, à une distance de 5-10 cm des murs en maçonnerie de pierre d'environ 50 cm d'épaisseur. La transmission au sol des charges verticales est garantie par les poteaux en bois ou par la maçonnerie, selon la séquence de leur mise en œuvre. Dans la très grande majorité des cas, ce sont les murs qui soutiennent les systèmes porteurs horizontaux tandis que les poteaux en bois les remplacent en cas de défaillance, comme dans les constructions correspondant au type de structure précédent.

Bien que des bâtiments avec un double système porteur vertical existent dans plusieurs régions sismiques le long de la chaîne alpino-himalayenne, par exemple dans l'Etat indien du Maharashtra (Revi & Kishore 1994), ce type de structure est aujourd'hui connu surtout en raison de sa grande diffusion sur l'île grecque de Leucade (Karababa & Guthrie 2006; Vintzileou et al. 2007). Ici, il était utilisé déjà au XVIII^e siècle (Porphyrios 1971), mais, il se serait répandu spécialement suite au séisme de 1825, grâce aux pouvoirs institutionnels ayant, de fait, commandité la réalisation de bâtiments témoins (Karababa 2007). Il est intéressant de préciser que, dans ces architectures de Leucade, les murs s'appuient sur une semelle filante en pierre qui repose, à son tour, sur une grille horizontale de rondins en bois et remplie avec du sable et des moellons : une astuce limitant les problèmes de tassement différentiel dus aux sols meubles (Demosthenous & Makarios 2006).

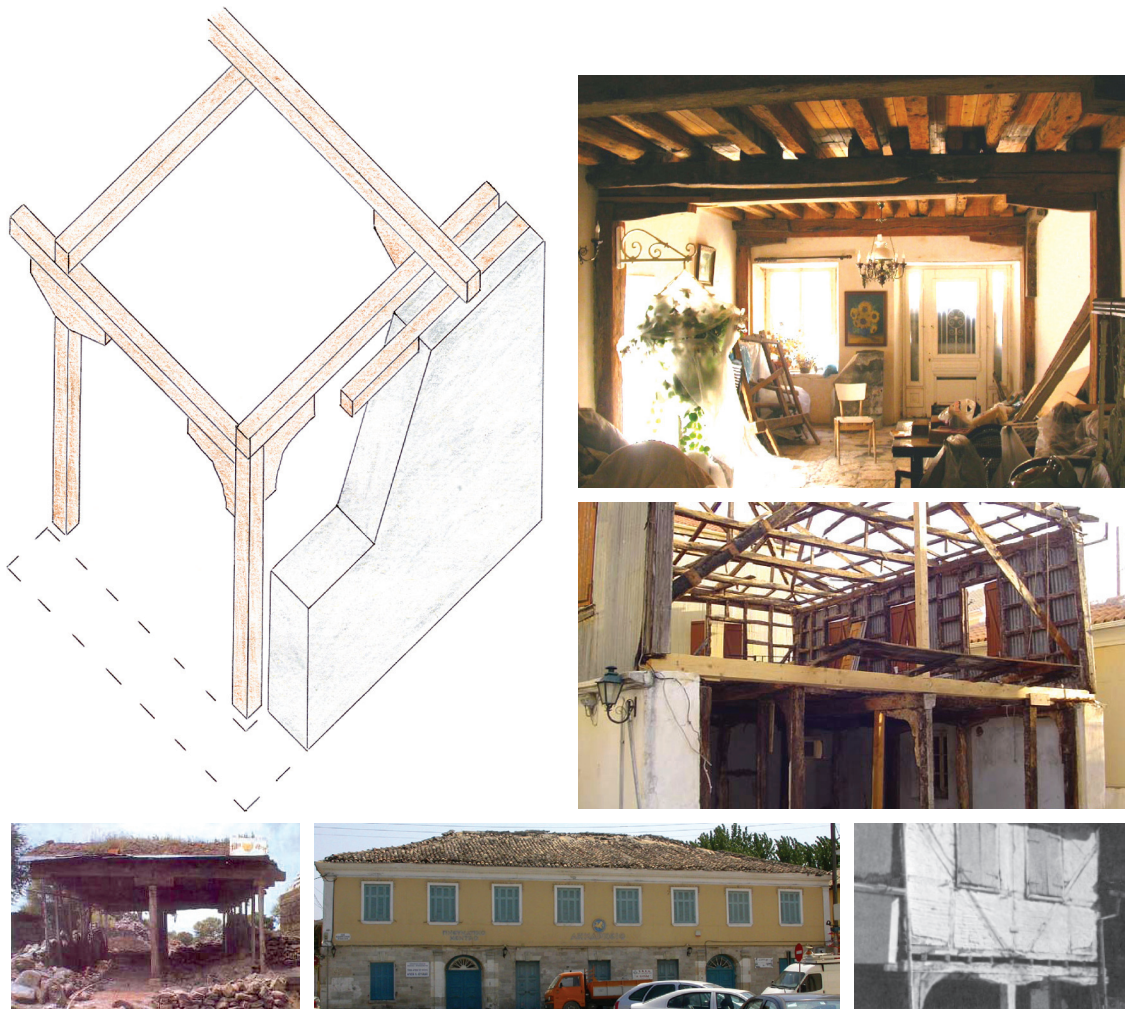


Fig.53 Système à poteaux-poutres associé aux maçonneries : a) Axonométrie ; b,c,e,f) Bâtiments de deux étages sur l'île de Leucade, Grèce (Crédits : b,e, Makarios et Demosthenous ; c, Karababa et Guthrie ; f, Porphyrios) ; d) Structure dans l'Etat du Maharashtra, Inde (Crédit : Revi et Kishore).

TYPE 10_ OSSATURE EN BOIS AVEC PAREMENT EN MAÇONNERIE

Les bâtiments correspondant à ce type de structure se composent d'une ossature en bois et d'un parement autoporteur en maçonnerie de brique ou de pierre. L'ossature se particularise par les traits suivants : elle ne présente aucun type de remplissage ; la section des éléments est relativement épaisse, mesurant jusqu'à 25 cm ; la trame est régulièrement divisée en des cellules élémentaires (modules primaires composant l'ossature) d'environ 1-1,50 mètres de largeur, contreventées par des diagonales placées en forme de croix de St. André.

Ce type de structure caractérise, en particulier, le bâti vernaculaire des régions centrales et méridionales d'Italie. Bien qu'adopté déjà au XIV^e siècle (Masciari-Genoese 1915), il s'est largement diffusé après le violent tremblement de terre de 1783 en Italie du Sud, quand les bâtiments à ossature furent institutionnellement promus par le biais de prescriptions émises par le Gouvernement des Bourbons (Ruggieri 2005 ; D'Antonio 2013). À cette occasion, les responsables en charge de l'évaluation des dégâts constatèrent leur bonne performance¹³⁷ (Tobriner 1997). Il est intéressant de noter que l'étymologie du terme italien employé pour indiquer ces bâtiments (*baraccata*) renvoie à des constructions à caractère provisoire. Ce lien serait dû au fait que le procédé constructif associé à ce type de structure a été souvent utilisé pour la réalisation d'abris d'urgence après des séismes destructeurs ou pendant les séquences sismiques d'une durée particulièrement longue, comme ce fut le cas dans la province de Rieti au XIV^e siècle.

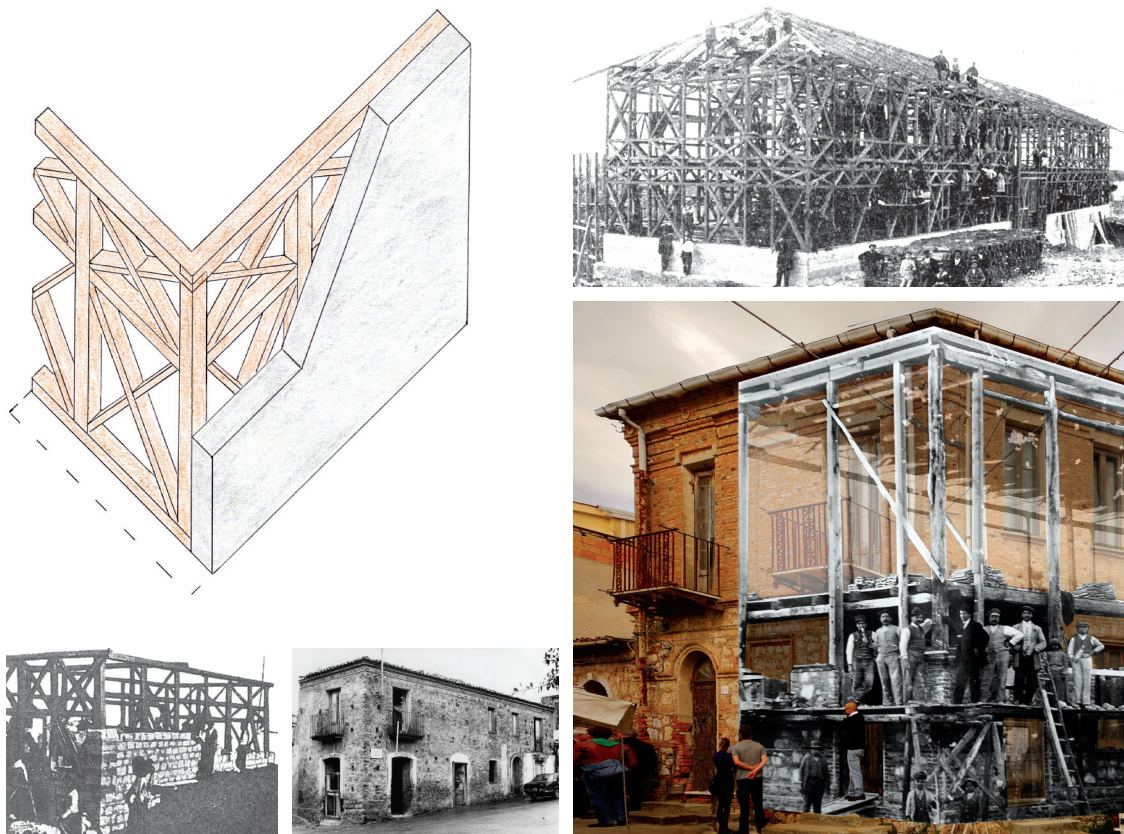


Fig.54 Ossature avec parement : a) Axonométrie ; b) Bâtiment en construction à Reggio Calabria, Italie (Source : Fabrizio 1933) ; c) Superposition de la photographie d'un bâtiment (2013) avec une vue de son chantier, Mileto, Italie (Crédit photo récente et photomontage : Langenbach) ; d) Chantier à Monteleone, Italie (Source : Barucci 1990) ; e) Bâtiment achevé dans la ville italienne de Filadelfia (Crédit : Tobriner).

¹³⁷ Par exemple, la ville de Filogaso fut entièrement détruite à l'exception d'un palais en ossature de bois (Fabrizio 1933). D'ailleurs, l'efficacité de ce procédé constructif a été démontré également lors d'événements sismiques plus récents, comme à l'occasion de celui ayant frappé l'Italie du Sud en 1908 : dans une partie de la ville de San Procopio aucune maison ne s'est effondrée car ainsi édifiées après le séisme de 1894.

TYPE 11_ OSSATURE EN BOIS DE SECTION ÉPAISSE AVEC REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE

Comme dans les tous premiers types de structures présentés dans ce chapitre, dans celui-ci, les éléments en bois et les parties en maçonnerie se fusionnent à nouveau. Toutefois, leur rôle structurel se renverse : le système porteur vertical est constitué par une ossature en bois qui est par la suite remplie avec des panneaux en pierre ou en briques de terre crue ou cuite. Cette ossature est composée d'éléments de section épaisse (entre 15-20 cm) et présente, dans la plupart des cas, une trame très régulière : les montants sont disposés avec un espacement d'environ 1 mètre et sont reliés par des traverses et des diagonales de contreventement, très souvent en forme de croix de St. André.

Ce type de parois caractérise certains ouvrages millénaires d'époque romaine¹³⁸ ainsi que le bâti vernaculaire de nombreuses régions européennes¹³⁹, même de celles à faible sismicité. Sa revitalisation dans les temps récents doit être mise en relation avec le séisme de 1755 de Lisbonne, quand, un groupe d'ingénieurs militaires fut mandaté par les cadres institutionnels d'élaborer un procédé constructif résistant aux séismes et aux incendies (Cardoso et al. 2004). Le choix d'une ossature avec remplissage résultait de l'examen des bâtiments vernaculaires ayant résisté à ce même tremblement de terre (Ece Ferah 2009) ainsi que des connaissances techniques développées dans l'ingénierie navale. Celles-ci auraient indiqué qu'une structure en bois peut se déformer, dans ses parties, tout en se comportant de manière homogène, dans son ensemble (Correia 2002). Dans les bâtiments à plusieurs étages reconstruits à Lisbonne, les ossatures des parois intérieures composent, de fait, un système structurel continu, d'où leur appellation *gaiola* signifiant « cage » (Paula & Cóiás 2006). Dans l'Europe de cette période, ce procédé constructif particulier - dénommé aussi *pombalino* en raison de sa large promotion de la part du Marquis de Pombal -, était considéré comme d'avant-garde (Borda d'Água & Jacob 2007) ; d'ailleurs, il serait le premier à avoir été promu après la validation de son comportement sismique par le biais d'essais expérimentaux sur des prototypes (Langenbach 2007).

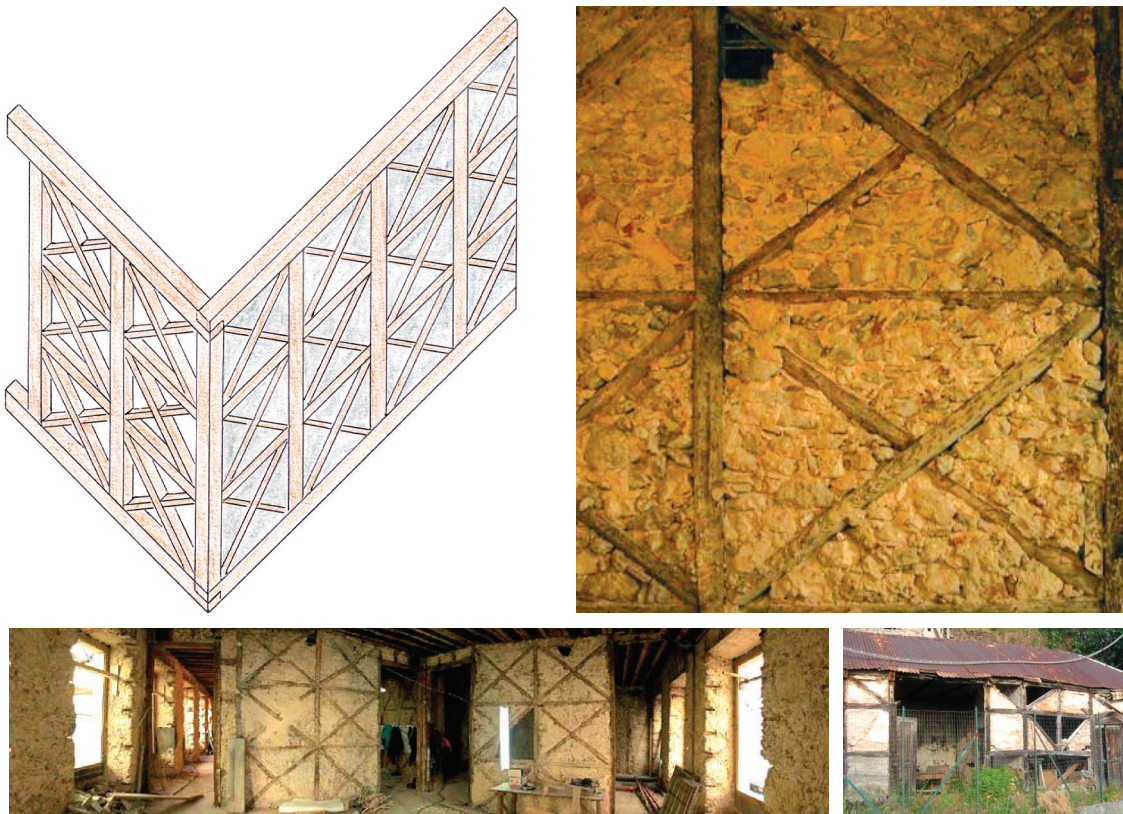


Fig.55 Ossature de section épaisse avec remplissage : a) Axonométrie de la variante avec croix de St. André ; b,c) Parois intérieures, Lisbonne, Portugal (Crédits : Langenbach) ; d) Structure à Reggio Calabria, Italie (Source : prolocoreggio-calabria).

138 Les fouilles effectuées par les archéologues dans la ville romaine d'Herculanum, en Italie, submergée par l'éruption volcanique du Vésuve dans l'année 79 av. J.-C, ont permis de faire un saut en arrière de 2000 ans et de retrouver les premiers exemples de structures à ossature en bois avec remplissage en maçonnerie de pierre (Langenbach 2007).

139 En effet, les architectures correspondant à ce type de structure sont très semblables à celles réalisées avec les procédés dénommés *Half-Timbered* (Angleterre), *Colombage* (France) et *Fachwerk* (Allemagne), tant dans la dimension des éléments composant l'ossature en bois que dans la manière de les agencer.

TYPE 12_ OSSATURE EN BOIS DE SECTION RÉDUITE AVEC REMPLISSAGE

La particularité principale des bâtiments correspondant à ce type de structure réside dans la section très faible des éléments en bois qui constituent l'ossature : pour celle des éléments primaires (montants, traverses et diagonales), elle mesure entre 10 et 15 cm, tandis que l'épaisseur des éléments de subdivision peut diminuer jusqu'à 5 cm. La section réduite de l'ossature fait que la résistance statique des architectures ainsi réalisées repose largement sur le remplissage, généralement en maçonnerie de pierre ou en briques de terre crue ou cuite. Une autre dissemblance entre les ossatures de ce type et celles du précédent, est la géométrie changeante de leur trame : la dimension des cellules élémentaires peut considérablement varier d'un ouvrage à l'autre, comme également au sein d'un même bâtiment, et les diagonales de contreventement sont mises en œuvre sans forcément respecter une forme régulière.

Des architectures de ce type ont été documentées dans presque toutes les régions sismiques situées le long de la chaîne alpino-himalayenne, notamment sur le territoire oriental. Au Pakistan, le terme en perse couramment utilisé pour les indiquer (*dhajji*) désigne un tissu fabriqué à partir de la réutilisation des rebuts (Schacher & Ali 2009) ; les bâtisseurs auraient vraisemblablement utilisé les éléments en bois à disposition, d'où l'irrégularité marquée des trames des ossatures, une particularité qui n'a pourtant pas empêché leur bon comportement lors du séisme de 2005. Dans le territoire anatolien, ce procédé constructif semblerait s'être répandu surtout au VIII^e siècle (Langenbach 2003) ; en 1766, il fut même adopté pour édifier la maison de la famille du Sultan, en raison de la bonne performance qu'il avait démontré lors du tremblement de terre ayant frappé la ville d'Istanbul (Tobriner 2000). Pour cette même raison, de nombreux ingénieurs et représentants institutionnels ont commencé à nouveau à s'intéresser à ce procédé et à son caractère parasismique, suite au séisme de Kocaeli de 1999 ; ceci après qu'il avait été presque complètement négligé à partir de la moitié du XX^e siècle (Doğangün et al. 2006).

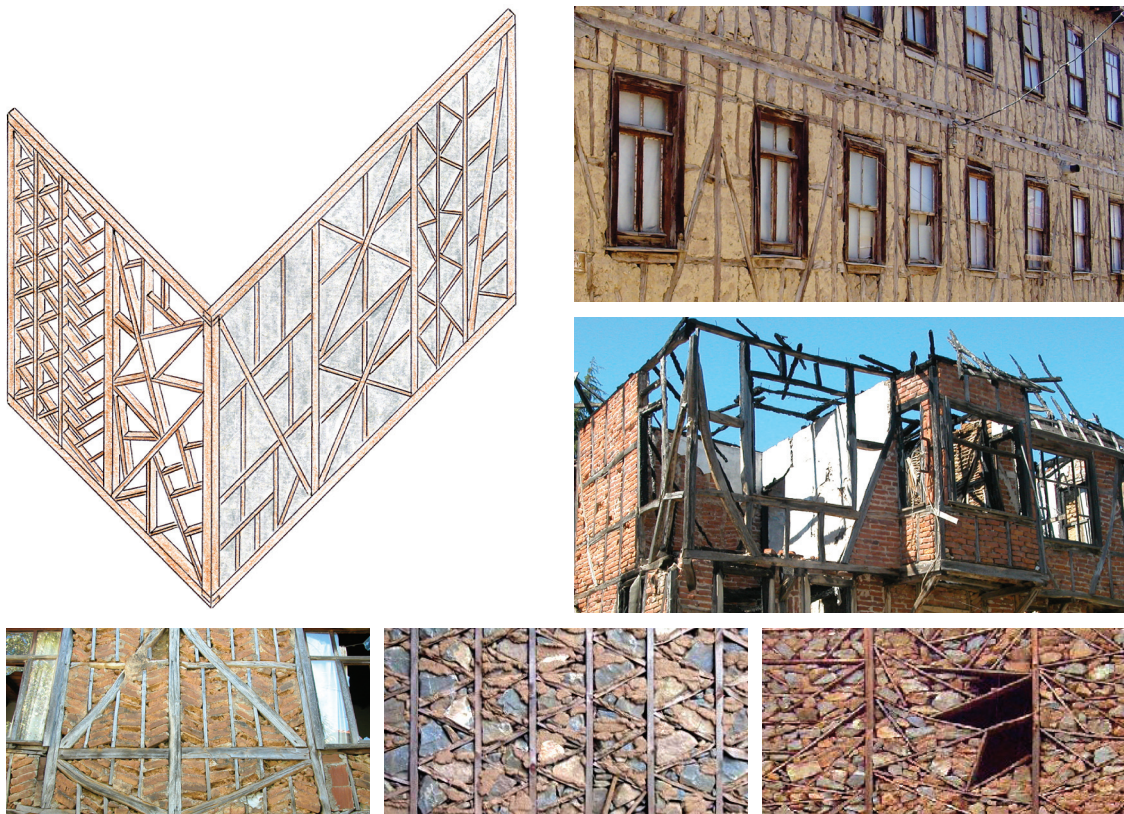


Fig.56 Ossature de section réduite avec remplissage : a) Axonométrie combinant différentes trames ; Bâtiments dans les villages turques de Sölöz (b) et de Sarayli (c) ; Eléments de subdivision des ossatures à Sarayli en Turquie (d) et au Pakistan (e,f, Crédits : Schacher).

1.3. GROUPES TYPOLOGIQUES

Bien que l'ensemble des ouvrages architecturaux présentés ci-dessus ait été mis en œuvre uniquement avec trois matériaux (le bois, la pierre et la terre), douze types de structures différents peuvent être distingués ; ce qui est représentatif de l'hétérogénéité constructive qui se dissimule dans les pratiques développées au fil du temps pour réduire la vulnérabilité sismique des environnements bâtis.

Un autre aspect qui émerge de cette analyse est le niveau variable de diffusion géographique des procédés constructifs vernaculaires. Certains se sont développés dans des territoires circonscrits ; par exemple, la méthode basée sur la superposition de paires de petits tasseaux en bois perpendiculaires afin de constituer des « piliers creux » (*type 7*) a été documentée exclusivement dans les régions montagneuses de l'Himalaya. Alors que d'autres types de structures se sont répandus à une échelle beaucoup plus large, voire dans la plupart des pays le long de la chaîne alpino-himalayenne, de l'Ouest à l'Est : c'est le cas des maçonneries comprenant des insertions horizontales en bois en forme d'échelle (*type 2*) ainsi que des ossatures en bois de section réduite avec remplissage (*type 12*).

Parmi ces différents types de structures, quatre grands groupes peuvent être reconnus selon leurs traits généraux :

- Groupe 1 : Maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois

Un premier groupe réunit les architectures qui possèdent des murs porteurs en maçonnerie dans lesquels des éléments en bois sont intégrés dans le sens horizontal. Ces insertions peuvent correspondre à des rondins en bois noyés dans la masse du mur (*type 1*), à des tasseaux disposés en forme d'échelle (*types 2 & 3 & 6*) ou à des éléments occupant toute la section de la maçonnerie (*types 4 & 5 & 6*) ;



Fig.57 Elévations et sections : a) Maçonnerie avec insertions horizontales en bois noyées dans la masse ; b) Maçonnerie avec insertions horizontales en bois en forme d'échelle ; c) Piliers avec insertions horizontales en bois en forme d'échelle au niveau des planchers.

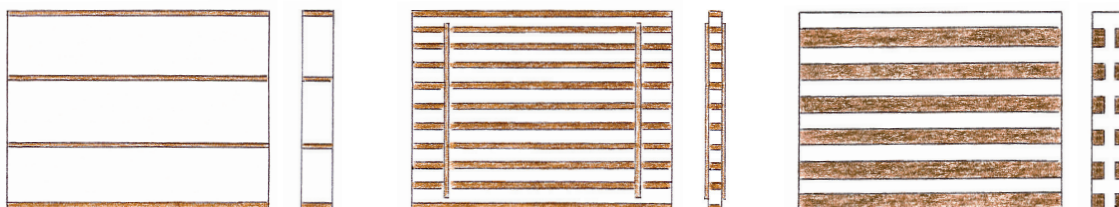


Fig.58 Elévations et sections : a) Maçonnerie avec insertions horizontales en bois occupant toute la section murale ; b) Maçonnerie de faible épaisseur avec insertions horizontales en bois rapprochées ; c) Maçonnerie épaisse avec insertions horizontales en bois rapprochées.

- Groupe 2 : Maçonnerie associée en parallèle avec une structure en bois

Les constructions du deuxième groupe se particularisent par la constitution d'un double système porteur vertical : des murs en maçonnerie sont associés à une structure en bois. Cette dernière peut se présenter en forme de « pilier creux » composé de tasseaux, ensuite rempli avec des

pierres (*type 7*), en tant que montants et traverses intégrés dans la maçonnerie (*type 8*) ou comme système à poteaux-poutres séparé des murs porteurs (*type 9*) ;

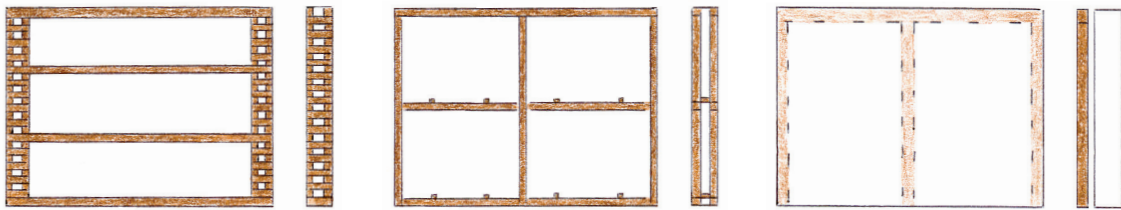


Fig.59 Elévations et sections : a) Maçonnerie avec éléments horizontaux en bois superposés en forme de pilier creux ; b) Maçonnerie avec éléments horizontaux et verticaux en bois ; c) Système à poteaux-poutres en bois associé à des murs en maçonnerie.

- Groupe 3 : Ossature en bois sans remplissage

Le troisième groupe rassemble les bâtiments qui se distinguent par la présence d'une ossature porteuse en bois sans remplissage mais avec un revêtement, notamment un parement en maçonnerie (*type 10*) ;

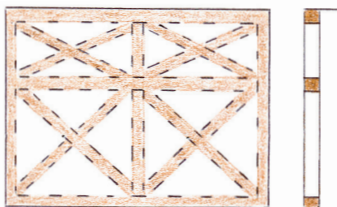


Fig.60 Elévation et section : Ossature en bois avec parement en maçonnerie.

- Groupe 4 : Ossature en bois avec remplissage

Les architectures de ce quatrième groupe sont celles dont le système porteur vertical est constitué d'une ossature formant des panneaux de remplissage (*types 11 & 12*).

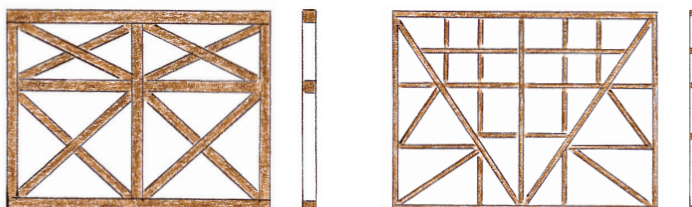


Fig.61 Elévations et sections : a) Ossature en bois de section épaisse avec remplissage en maçonnerie ; b) Ossature en bois de section réduite avec remplissage.

Cette classification fait surgir un aspect intéressant : sur les 12 types de structures identifiés, 6 sont réunis dans le groupe des bâtiments en maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois (*groupe 1*). À ce propos, il est important de constater qu'en dépit du fait que cette pratique constructive ait été mise en œuvre en plusieurs variantes et dans de nombreux pays, les recherches approfondies consacrées aux éventuels avantages qu'elle offre sont relativement restreintes, si on les compare à celles focalisées sur d'autres procédés, par exemple, ceux en ossature bois (*groupes 3 & 4*).

DES TYPES DE STRUCTURES AUX CARACTÉRISTIQUES PARASISMIQUES

Afin de mieux cerner les facteurs à la base de la bonne performance des types de structures présentés, dans le chapitre suivant, l'attention est focalisée sur les particularités structurelles qui sont susceptibles de leur permettre de faire face à des sollicitations horizontales aussi puissantes que celles induites par des tremblements de terre, en les rapportant à des caractéristiques parasismiques précises.

2. CARACTÈRE PARASISMIQUE DU BÂTI VERNACULAIRE

2.1. SIX CARACTÉRISTIQUES PARASISMQUES

Les particularités structurelles qui contribuent à la bonne performance sismique du bâti vernaculaire sont nombreuses et très variées entre elles ; elles peuvent être différenciées selon qu'il s'agit de dispositions ou de dispositifs constructifs. Les premières coïncident avec les traits qui caractérisent le système porteur vertical dans sa globalité et se réfèrent, spécialement, au type d'appareillage de la maçonnerie ou à la géométrie de la trame de l'ossature. En revanche, les dispositifs constructifs correspondent à des mesures présentes de manière ponctuelle et qui se rapportent, par exemple, aux types de liaisons entre les différentes parties structurelles ou à des éléments constructifs spécifiques comme les insertions horizontales en bois.

Certaines de ces particularités structurelles permettent d'améliorer le comportement dynamique du bâti au travers de l'augmentation de sa capacité à dissiper l'énergie sismique ou par l'optimisation de la distribution des charges en son sein ; d'autres permettent de diminuer les forces d'inertie se générant dans la structure, grâce à une réduction de sa masse ou grâce à l'atténuation de l'accélération sismique à laquelle elle est soumise.

Ci-dessous, les particularités structurelles identifiées comme étant les plus remarquables sont présentées en les associant à six caractéristiques parasismiques distinctes, qui ont été définies en se référant spécifiquement aux types de structures composant le bâti vernaculaire. La nomenclature employée peut donc différer légèrement de celle qui est couramment utilisée pour décrire le caractère parasismique de bâtiments réalisés avec des procédés constructifs d'origine plus récente (p.e. ceux en béton armé).

2.1.1. LÉGÈRETÉ

La caractéristique parasismique de « légèreté » se rapporte aux aspects d'ordre constructif qui permettent de limiter les forces d'inertie qui se génèrent dans un bâtiment lors de secousses. Elle est donc intrinsèque aux constructions réalisées avec des systèmes porteurs verticaux dont les matériaux se caractérisent par un rapport résistance/poids élevé (matériaux résistants mais légers), en particulier, les ossatures bois avec des panneaux en maçonnerie, en rondins équarris ou en torchis (structure secondaire en bois recouverte d'une terre argileuse), ou les ossatures qui ne possèdent pas de remplissage mais présentent un revêtement extérieur (fig.62a; Er Akan 2004; Hicyilmaz 2011).

En ce qui concerne les systèmes porteurs verticaux en maçonnerie, une plus grande légèreté est parfois favorisée par des dissemblances entre les parties inférieures et supérieures, obtenues par une variation de l'épaisseur du mur, qui diminue avec la hauteur (fig.62b), ou avec l'utilisation de matériaux différents, plus légers. Par exemple, dans les cas des maçonneries de pierre avec des tasseaux en bois intégrés horizontalement, la fréquence de ces derniers peut augmenter de manière considérable du bas vers le haut (fig.62c), en réduisant ainsi la masse globale des parties supérieures du bâtiment (Thakkar & Morrison 2008).



Fig.62 Pour plus de légèreté : a) Ossature sans remplissage recouverte avec du lattis enduit, Bartin, Turquie ; b) Réduction d'un tiers de l'épaisseur de la maçonnerie, Struga, Macédoine ; c) Accroissement de la fréquence des éléments horizontaux en bois, Pujarli, Etat de l'Himachal Pradesh, Inde (Crédit : Takkar et Dave).

2.1.2. RÉPARTITION DES MASSES

Les aspects constructifs qui permettent de parvenir à une correcte « répartition des masses » sur la hauteur augmentent la prédisposition des ouvrages à faire face aux forces d'inertie. Les murs avec une épaisseur importante (et décroissante vers le haut) et qui possèdent des ouvertures de taille réduite représentent l'essence même de cette caractéristique parasismique. Néanmoins, elle peut être favorisée également selon d'autres modalités.



Certaines dispositions constructives visent explicitement à améliorer la stabilité du système porteur par un abaissement du centre de gravité de l'ensemble bâti : par exemple, les grandes plateformes massives en pierre sur lesquels repose la superstructure (fig.63; Rautela & Joshi 2008) ou l'emploi du bois pour les derniers étages des constructions en maçonnerie (Thakkar & Morrison 2008). D'autres mesures, touchant plus à la forme qu'à la matière, permettent d'agrandir la surface de contact entre le bâtiment et le sol, en renforçant ainsi son emprise au terrain et le stabilisant davantage, comme les contreforts adossés au murs (Lim-Castillo 2007).

Fig.63 Plateforme massive : Gona, Etat de l'Uttarakhand, Inde (Crédit : Rautela et Joshi).

En outre, des dispositifs constructifs particuliers accroissent le caractère massif des maçonneries de pierre, notamment celles en moellons, en constituant des arases au sein du mur qui favorisent une compression plus homogène et une plus grande compacité (Carocci 2001). Cet effet peut être obtenu par un agencement soigné des pierres (Decanini et al. 2004), par l'intégration d'assises en briques de terre cuite (fig.64a; Bothara & Brzev 2011) ou par l'inclusion d'éléments en bois (fig.64b; Langenbach 2000).

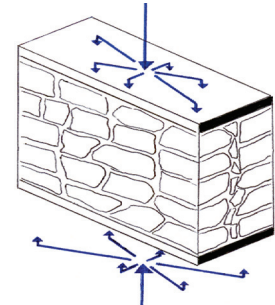


Fig.64 Arases dans le mur : a) Assise en briques de terre cuite traversant la section de la maçonnerie de pierre, Ohrid, Macédoine ; b) Planche en bois occupant toute l'épaisseur du mur, Safranbolu, Turquie ; c) Schéma : répartition de la pression verticale.

2.1.3. FACTEURS DE RIGIDITÉ

Les particularités structurelles à mettre en rapport avec la caractéristique parasismique de « rigidité » sont celles qui permettent à un ensemble bâti de résister à un tremblement de terre sans qu'il se produise un mouvement ou une déformation importante des éléments qui le composent.

Dans les cas des ossatures réalisées avec des matériaux aux propriétés élastiques (comme le bois ou le bambou), un certain niveau de rigidité est obtenu par le biais d'un système de contreventement qui, d'une part, garantit la stabilité des structures non auto-stables et, d'autre part, permet de raidir celles qui risqueraient de se déformer de manière excessive sous des pressions horizontales (Zacek 2004a). Divers autres dispositifs augmentent la rigidité, comme les équerres en bois disposées entre les poteaux et les poutres (fig.65a; Porphyrios 1971) ou les très longs chapiteaux placés entre les montants et les soles hautes raidissant ces dernières (fig.65b; Karababa & Guthrie 2006). Les assemblages à tenon et mortaise, à encoche, ou réalisés à l'aide de chevilles en bois ou de pièces métalliques, contribuent également à rendre plus rigide un ensemble structural en ossature (fig.65c,d; Tobriner 1997; Rautela & Joshi 2008; Schacher 2008a).



Fig.65 Liaisons entre éléments de l'ossature : Présence d'équerres en bois entre poteaux et poutres (a, Crédit : Makarios et Demosthenous) et de chapiteaux entre montants et soles hautes (b, Crédit : Karababa et Guthrie), Leucade, Grèce ; c) Assemblages à encoche, Lisbonne, Portugal (Crédit : Cardoso) ; d) Joint à tenon et mortaise avec feuillet métallique entre montant et sole basse, Pakistan (Crédit : Schacher).

Dans les structures en maçonnerie, certaines dispositions constructives contribuent à leur raidissement transversal, comme l'utilisation régulière de pierres en boutisses traversantes (fig.66a) ou le verrouillage des moellons avec des cailloux ou des pierres taillées (fig.66b,c; Carocci 2001). D'autres mesures permettent d'augmenter leur adhérence ; parmi celles-ci on peut mentionner l'emploi d'un mortier à haute résistance mécanique en ciment ou à la chaux (Coburn & Spence 1992) ou d'un mortier en terre crue mélangé à des matières organiques ou végétales améliorant son action¹⁴⁰. La liaison entre les unités maçonnées peut être également améliorée par un système de décrochements et entailles dans les blocs, ainsi que par des agrafes, des chevilles ou grâce à une forme polygonale des blocs qui s'imbriquent les uns dans les autres (Ferrigni et al. 2005; NIKER 2010).



Fig.66 Rigidification de la maçonnerie : a) Pierres en boutisses traversantes, Kastamonu, Turquie ; b) Verrouillage des moellons avec des cailloux, Navelli, Italie ; c) Verrouillage des blocs avec des pierres taillées, Değirmendere, Turquie ; d) Schéma : coupe d'une maçonnerie en moellons avec verrouillage.

Parfois, la rigidité d'un ensemble structurel est augmentée par la mise en place de dispositifs de plus grande taille. Par exemple, dans les murs en maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois (notamment dans ceux dont l'épaisseur est faible), des longs éléments verticaux sont souvent fixés sur les deux côtés des murs en guise d'aiguilles stabilisatrices (fig.67), réduisant le risque de désolidarisation entre les différents éléments constructifs (Edelberg 1984). Celles-ci sont dans certains cas connectées à des poutres reliant entre eux les murs parallèles, en allant ainsi à augmenter davantage la rigidité globale du bâtiment (Rautela & Joshi 2008). Employées également pour des constructions entièrement en madriers de bois, ces aiguilles renforcent les systèmes porteurs verticaux qui, en raison de leur propre nature, seraient autrement exposés au phénomène d'instabilité ; souvent, elles sont effectivement employées à défaut de cloisons intérieures pouvant limiter la déformation des parois extérieures.



Fig.67 Stabilisation d'éléments horizontaux en bois de faible épaisseur avec des aiguilles verticales, vallée de Parun, Afghanistan (Crédit : Edelberg).

¹⁴⁰ Par exemple, pour augmenter la résistance d'un mortier en terre, le blanc d'œuf était souvent employé car l'albumen qu'il contient représente une protéine très résistante (Lim-Castillo 2007).

2.1.4. FACTEURS DE FLEXIBILITÉ

Les particularités structurelles qui permettent de dissiper l'énergie sismique grâce à la déformation des différentes parties de la construction, ou de l'ensemble bâti, sont à rapporter à la caractéristique parasismique de « flexibilité ».

Globalement, les éléments constructifs en bois (ou en bambou) jouent un rôle important dans la détermination du caractère flexible d'une construction, en raison de l'élasticité et de la bonne résistance à la traction du matériau, permettant à une ossature bois d'osciller avec les secousses, sans que des ruptures importantes se produisent.

En ce qui concerne les liaisons entre les éléments en bois, la prédilection de la part des bâtisseurs vernaculaires pour des clous, plutôt que des pièces métalliques ou des assemblages à tenon et mortaise, peut être considérée comme corrélée à une volonté d'apporter une certaine flexibilité aux joints (Dikmen 2010) ; de fait, dans certains bâtiments, les types de connexion plutôt rigides sont réalisés exclusivement pour les cadres des portes ou des fenêtres (Şahin Güçhan 2007).

L'incidence du bois sur le caractère flexible d'un ensemble bâti peut être constatée également dans les structures en maçonnerie. Des ouvrages représentatifs sont ceux dont l'intersection de murs orthogonaux est réalisée en superposant de paires de petits tasseaux afin de constituer des « piliers creux » remplis avec des moellons (fig.68) ; en fait, ces piliers peuvent fléchir comme une vertèbre et se tordre de manière multidirectionnelle (Hughes 2005; Thakkar & Morrison 2008). De plus, leurs parties inférieures sont parfois réalisées avec un nombre beaucoup plus important d'éléments en bois (fig.68c), variation qui limite le risque de rupture là où les contraintes dues aux accélérations sismiques peuvent être particulièrement élevées (Kontogiannis 2010).

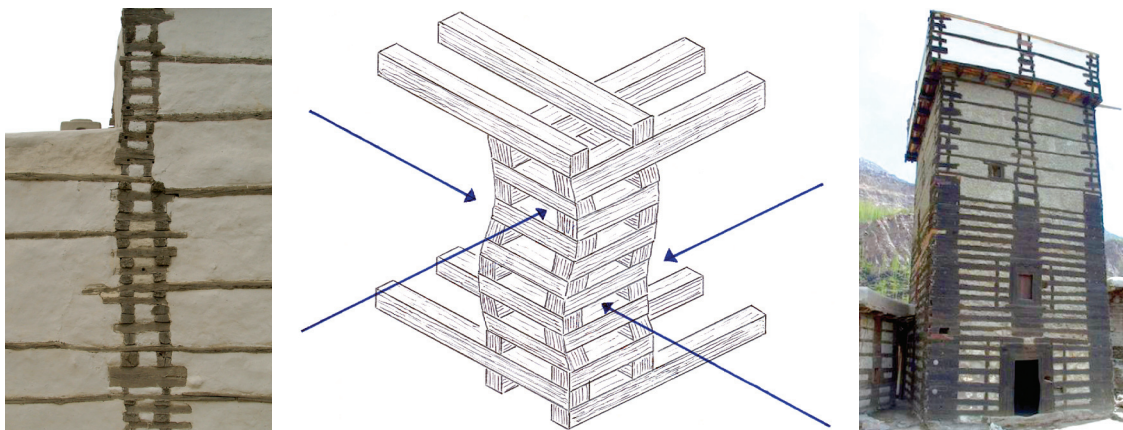


Fig.68 « Piliers creux » constitués de paires de tasseaux : Forts pakistanais à Hunza (a, Crédit : Schacher) et à Baltit (c, Source : wikipedia) ; b) Schéma : déformation du « pilier » dans plusieurs directions.

Certains aspects constructifs peuvent renvoyer à la caractéristique parasismique de flexibilité de manière beaucoup plus indirecte. Ainsi, dans les cas où une structure en bois est additionnée à des murs porteurs, leur écartement permet un mouvement des poteaux, beaucoup plus flexibles que la maçonnerie, évitant ainsi que des dégâts dus à l'effet de martèlement se produisent (Karababa 2007).

2.1.5. DUCTILITÉ

Les propriétés d'un ouvrage qui permettent d'assurer une bonne « ductilité » sont celles qui favorisent la dissipation de l'énergie sismique grâce à la déformation plastique des éléments constructifs et/ou de l'ensemble structurel¹⁴¹. Elles peuvent être regroupées en deux catégories en fonction de la manière selon laquelle l'énergie sismique est dissipée.

141 La ductilité est définie comme le rapport entre la déformation ultime et la déformation à l'initiation de la plastification ; « plus un élément est doté d'une grande capacité de dissipation d'énergie plus son comportement sismique est favorable puisqu'il doit alors moins se déformer pour dissiper l'énergie introduite par le séisme » (Lestuzzi & Badoux 2008, p.80).

D'une part, la dissipation peut s'effectuer par des mouvements à l'interface entre plusieurs éléments constructifs ; elle a donc lieu par « frottement externe ». Ce frottement est parfois favorisé par l'absence de liaisons mécaniques entre les parties en bois et celles en maçonnerie, permettant ainsi des déplacements dans les plans d'interface (fig.69; Langenbach 2009). Des mouvements peuvent également se produire entre les unités maçonnées, en particulier, dans le cas des murs en pierres sèches ou mis en œuvre avec un mortier à faible résistance mécanique. Des frottements dissipant une partie de l'énergie sismique peuvent avoir lieu aussi en correspondance des assemblages, notamment ceux réalisés par entaille du bois (Doğangün et al. 2006) ou ceux à tenon et mortaise pourvus de cales de fixation qui favorisent un va-et-vient important (Gruber 2007). Même dans les cas de connexions pourvues de chevilles, de clavettes en bois ou de goujons métalliques, elles sont souvent réalisées de manière à permettre un déplacement latéral, bien que ceci soit généralement minime (Rautela & Joshi 2008; Thakkar & Morrison 2008).



Fig.69 a) Schéma des zones de frottement externe entre la maçonnerie et les insertions horizontales en bois ; b) Bâtiment après un séisme, Velmey, Macédoine ; c) Schéma des zones de frottement externe entre l'ossature bois et le remplissage ; d) Bâtiment après un séisme, Değirmendere, Turquie.

L'énergie sismique peut être également dissipée au travers de la déformation plastique des matériaux ; dans ce cas, la dissipation est la résultante d'un « amortissement interne ». Cet amortissement a lieu dans les mortiers à faible résistance mécanique, en particulier ceux en terre crue, où des nombreux petits mouvements peuvent se générer en correspondance de microfissures (Hicyilmaz 2011).

Dans les bâtiments édifiés selon le concept d'isolation sismique, la dissipation de l'énergie peut se produire entre la superstructure et les parties en contact avec le terrain, grâce à un important déplacement latéral. De manière analogue aux isolateurs sismiques modernes, certains dispositifs permettent d'atténuer les charges auxquelles la superstructure doit répondre. Dans certains cas, le mouvement horizontal est favorisé par le roulement des rondins perpendiculaires superposés, sur deux ou trois niveaux ; ce dispositif a été identifié en tant qu'appuis ponctuels (fig.70a; Naderzadeh 2009) et au niveau des fondations de murs porteurs en maçonnerie (fig.70b; Demosthenous & Makarios 2006). Dans d'autres cas, la dissipation de l'énergie sismique est permise par la présence, au-dessous de la superstructure, d'une plateforme compacte en pierres sèches, au sein de laquelle des mouvements peuvent se produire sans qu'une désagrégation totale de la maçonnerie n'ait lieu (Rautela & Joshi 2008).

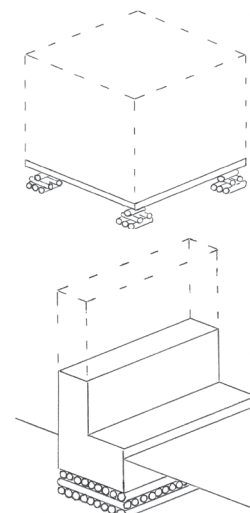


Fig.70 Schémas de l'emplacement des rondins en bois permettant un mouvement latéral : a) Appuis ponctuels ; b) Fondations de murs porteurs.

À propos de l'ensemble de ces dispositions et dispositifs constructifs, il est intéressant de noter qu'en dissipant une partie de l'énergie sismique, ils limitent considérablement le risque d'amplification des forces sismiques due à l'effet de résonance car ils permettent de découpler la période de vibration du bâtiment de celle du tremblement de terre¹⁴² (Doğangün et al. 2006).

2.1.6. REDONDANCE

La caractéristique parasismique de « redondance » distingue les systèmes porteurs dont le risque d'effondrement global est limité même en cas de rupture de certains des éléments structuraux qui les composent (Langenbach 2009). Cette caractéristique est favorisée par l'ensemble des particularités structurelles qui circonscrivent les mécanismes de rupture, dus à des défaillances localisées, ou qui empêchent la concentration de contraintes dans un seul et unique endroit.

Dans les systèmes porteurs à ossature, de multiples chemins de forces sont garantis par la présence de montants, traverses et diagonales, ce qui permet de compenser des éventuels défauts dans l'un d'entre eux (fig.71a; Doğangün et al. 2006). Au sein des ossatures possédant un remplissage en maçonnerie, le niveau de redondance est amplifié par l'utilisation d'un mortier en terre crue ; celui-ci empêche la formation d'une fissuration destructive car sa faible résistance mécanique permet que des petits mouvements puissent avoir lieu dans l'ensemble du panneau (Langenbach 2000).

En ce qui concerne les murs porteurs en maçonnerie, le caractère redondant est recherché par l'intégration de matières résistantes à la traction, notamment le bois. Par exemple, la présence d'insertions horizontales permet de soulager les portions du mur ayant subi des dislocations, en transmettant les charges à des parties du bâtiment qui sont plus stables (fig.71b; Hughes 2000; Langenbach 2009).

Les types de structures avec un double système porteur vertical, où une structure en bois est combinée à des murs, présentent un caractère redondant particulièrement élevé. En cas de défauts d'un des deux systèmes (par exemple, la fissuration de la maçonnerie ou la rupture de composantes de l'ossature), l'autre permet de prévenir l'écroulement des systèmes porteurs horizontaux, au moins temporairement, le temps de réparer les parties endommagées (fig.71c; Karakostas et al. 2005; Vintzileou et al. 2007).

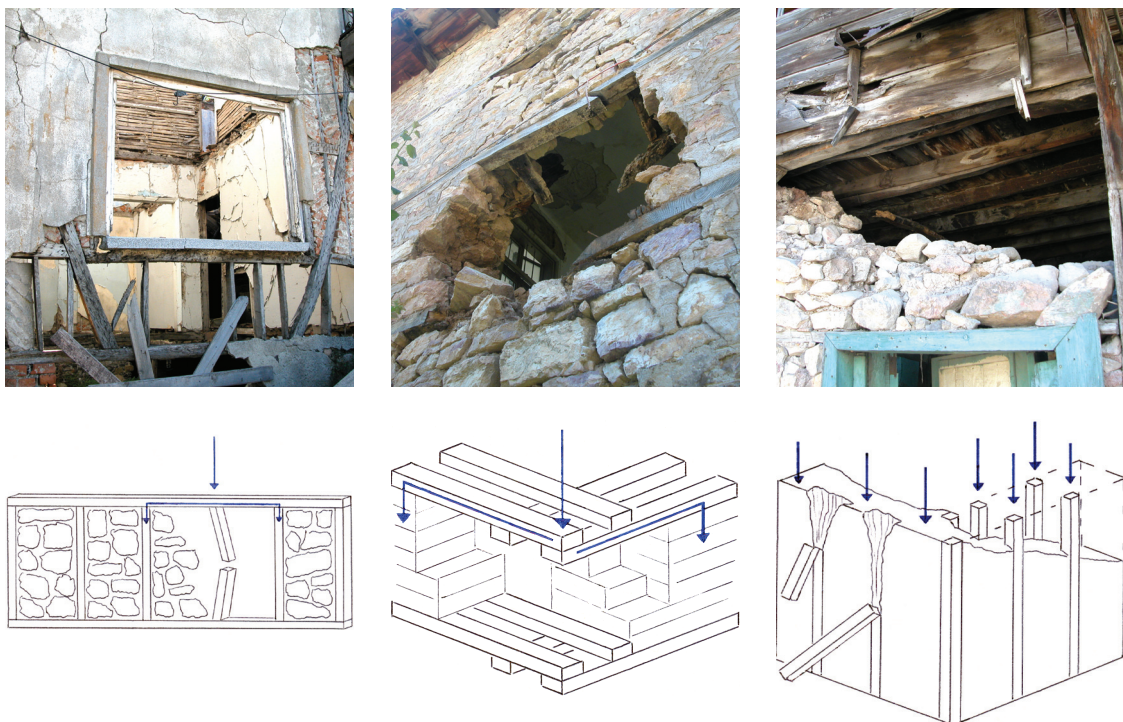


Fig.71 Possibles défaillances dans trois différents types de structures : a) Ossature bois avec remplissage, Değirmendere, Turquie, b) Maçonnerie avec insertions horizontales, Vevçani, Macédoine, c) Maçonnerie associée à une structure en bois, Tavşancil, Turquie ; d,e,f) Schémas indiquant la répartition des charges verticales dans les éléments structuraux plus stables.

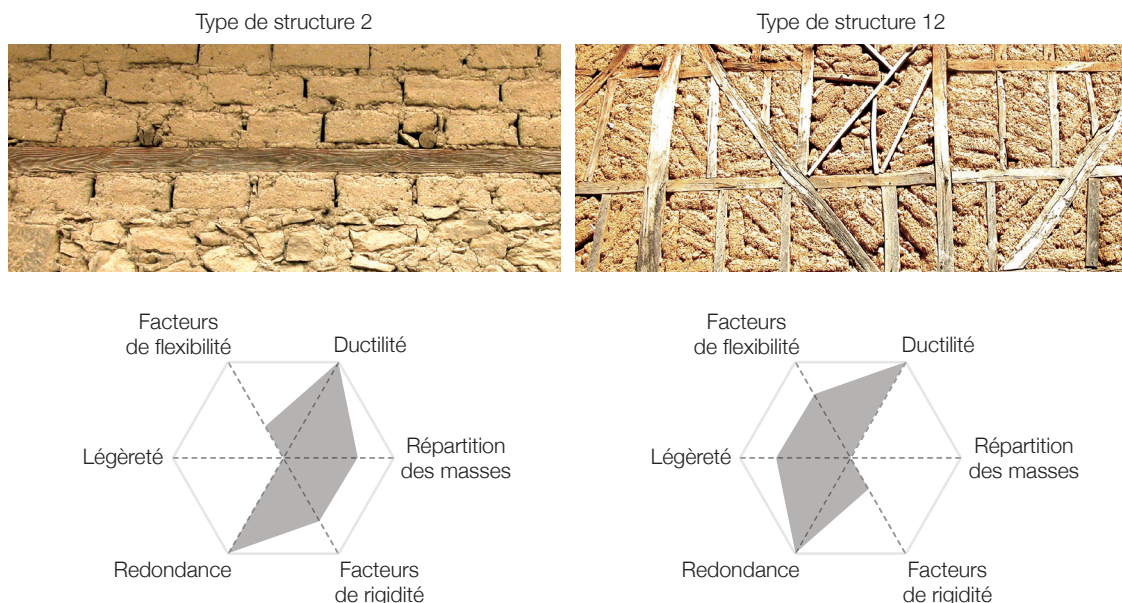
¹⁴² L'effet de résonance se présente quand la période des oscillations de la structure coïncide avec celle du mouvement du sol : dans ce cas, le mouvement global de l'ensemble bâti peut être multiplié par 2, voire plus (Balandier 2004).

2.1.7. PLURALITÉ DES CARACTÉRISTIQUES PARASISMIQUES DANS 2 TYPES DE STRUCTURES

La bonne performance sismique d'une construction vernaculaire ne repose pas sur une seule et unique caractéristique parasismique : les particularités structurelles qui lui permettent de faire face à des tremblements de terre, sans subir des dégâts majeurs, sont multiples et peuvent être rapportées à plusieurs des six caractéristiques parasismiques présentées auparavant.

À titre indicatif, on peut récapituler l'importance que celles-ci semblent assumer dans la bonne performance des bâtiments correspondant aux deux types de structures identifiés comme étant les plus répandus le long de la chaîne alpine-himalayenne (tab.8) :

- Maçonnerie avec insertions horizontales en bois en forme d'échelle (type 2)
 Le caractère massif et rigide de ce type de structure assume une importance primaire (*répartition des masses et facteurs de rigidité*). Néanmoins, les insertions confèrent une certaine flexibilité aux murs, grâce à l'élasticité du bois et à sa résistance aux forces de traction (*facteurs de flexibilité*). Dans ces structures, la dissipation d'une partie de l'énergie sismique a lieu par le biais du frottement entre les insertions et les unités maçonnées ainsi qu'entre ces dernières (si non hourdées ou avec un mortier à faible résistance mécanique), ce qui apporte une capacité de déformation accrue à des murs dont le comportement serait autrement fragile (*ductilité*). De plus, lorsque des défaillances locales se produisent au sein de la maçonnerie, les insertions évitent la recrudescence des mécanismes de rupture en assurant le rôle de linteaux (*redondance*).
- Ossature en bois de section réduite avec remplissage en maçonnerie (type 12)
 Les propriétés du bois ainsi que la faible épaisseur des parois déterminent le rôle décisif joué par le caractère flexible et léger de ce type de structure (*facteurs de flexibilité et légèreté*). Son caractère rigide n'est, toutefois, pas négligeable ; en fait, bien que l'ossature réponde aux secousses en se balançant avec elles, sa réponse n'est pas complètement élastique car la présence du remplissage ne lui permet pas de fléchir de manière complètement libre (*facteurs de rigidité*). Au sein de ces constructions, une partie importante de l'énergie sismique est dissipée au travers de l'amortissement interne du mortier en terre crue (à faible résistance mécanique) et par le biais du frottement entre le bois de l'ossature et les panneaux en maçonnerie (*ductilité*). En outre, la trame dense de l'ossature caractéristique à ces architectures permet également de délimiter les défauts qui se génèrent dans le remplissage, en réduisant ainsi le risque de déstabilisation globale des parois (*redondance*).



Tab.8 Diagrammes illustrant le degré d'importance estimée des six caractéristiques parasismiques, sur la bonne performance de deux types de structures : a) Maçonnerie avec insertions horizontales en bois en forme d'échelle, b) Ossature en bois de section réduite avec remplissage en maçonnerie.

2.2. UNE QUESTION DE FIABILITÉ ET DE VIABILITÉ

2.2.1. GAGE DE SÉCURITÉ

En se référant à l'ensemble des types de structures en matériaux mixtes examinés, on remarque que les degrés d'importance des caractéristiques parasismiques qui se rapportent à la « légèreté », à la « répartition des masses », à des facteurs de « rigidité » et de « flexibilité », peuvent considérablement varier au cas par cas ; tandis que les caractéristiques parasismiques qui se rapportent à la « ductilité » et à la « redondance » assument régulièrement un rôle primaire dans leur bonne performance. L'importance de la ductilité et de la redondance réside principalement dans le fait qu'elles constituent un véritable gage¹⁴³ de sécurité en cas d'événement sismique. Leur portée peut être effectivement mise en lumière en considérant le niveau d'endommagement subi par les structures qui se particularisent par le fait d'être ductiles et redondantes.

Ci-après, trois aspects principaux sont évoqués en faisant référence au comportement du bâti vernaculaire lors du séisme de 1999 (M 7.4) qui a affecté la province de Kocaeli, dans le Nord Ouest de la Turquie¹⁴⁴ (Gülhan & Güney 2000). Bien que ces aspects soient ici mis en relation spécifiquement avec des constructions en ossature bois avec remplissage en maçonnerie, ils sont distinctifs de la plupart des types de structures ayant démontré une bonne performance lors d'autres événements sismiques :

- premièrement, elles sont peu enclines à subir des dégâts pouvant mettre sérieusement en péril la vie de ses habitants, même lors de secousses particulièrement violentes. Lors de l'événement sismique considéré, le nombre de celles qui se sont effondrées a été presque 15 fois inférieur à celui observé pour les bâtiments plus récents¹⁴⁵ ;
- deuxièmement, ces constructions se caractérisent par une lente dégénération de la structure qui, de fait, évolue progressivement en montrant de nombreux signes de déformation avant un éventuel effondrement. Parmi celles qui ont été endommagées par le séisme de Kocaeli, leur pourcentage décroît proportionnellement avec la gravité des dégâts, ce qui révèle que la transition d'une situation où les bâtiments ne sont pas endommagés à une condition où ceux-ci présentent des dégâts importants a lieu de manière graduelle¹⁴⁶ ;
- troisièmement, on peut noter qu'en dépit du fait que ces structures se déforment dès les premières secousses, elles se caractérisent par une prédisposition à dissiper l'énergie sismique pour une longue période avec une augmentation minimale des dégâts, donc, sans que le degré d'endommagement augmente de manière importante. En effet, en comparant les dégâts induits par le tremblement de terre de Kocaeli à ceux induits par un autre tremblement de terre de moindre puissance (M 5.9) toujours en Turquie, il a été constaté qu'ils sont très similaires (Doğangün et al. 2006; Langenbach 2009).

143 Le terme « gage » est compris comme « *tout ce qui représente une garantie, une caution* » (Source : Dictionnaire Larousse).

144 Le document pris comme référence coïncide avec une des rares sources écrites où les effets sismiques sur les architectures vernaculaires ont été analysés qualitativement, en considérant les différents niveaux des dommages, ainsi que quantitativement, prenant également en compte la distribution des dégâts dans l'environnement bâti.

145 Dans le quartier de Sehitler (province de Kocaeli), 0.5 % des structures vernaculaires en ossature bois (2-4 niveaux) s'est effondré ou a subi des dégâts très importants, en provoquant le décès de 3 personnes. Le pourcentage s'élève à 7.4 % avec les structures plus récentes en ossature de béton armé (jusqu'à 8 niveaux) et les victimes de l'effondrement de celles-ci également : 287 (Gülhan & Güney 2000).

146 Dans le quartier de Kavakli (province de Kocaeli), la distribution des dégâts au sein des bâtiments vernaculaires est la suivante : 4.4 % s'est effondré ou a subi des dégâts très importants, 16.8 % des dégâts modérés, 19.3 % des dégâts légers et 59.5 % ne présente aucun dégât. Pour ce qui concerne les bâtiments récents, leur dégénération structurelle n'a pas lieu de manière graduelle comme dans le cas des constructions en ossature bois ; en fait, les bâtiments ayant subi des dégâts légers sont moins (10.6 %) que ceux présentant des dommages modérés (26.3 %), c'est-à-dire d'un degré d'endommagement supérieur (Gülhan & Güney 2000).

Par ailleurs, ces trois qualités propres à de nombreuses architectures vernaculaires permettent de satisfaire aux points du code de déontologie régissant la discipline du génie parasismique (Zacek 1996; Lestuzzi 2008) : en cas de séismes modérés, les éléments du système porteur ne doivent subir que des dégâts réparables tandis qu'en cas de secousses particulièrement violentes, ils peuvent subir des dommages irréparables mais sans toutefois provoquer l'effondrement de l'ensemble bâti.

2.2.2. MARGE DE MANŒUVRE

Le caractère parasismique des différents types de structures vernaculaires peut être également rapporté à la marge de manœuvre élevée des procédés constructifs qui leur sont associés. Une marge de manœuvre qui est à entendre comme la tolérance du procédé à d'éventuels défauts dans la qualité des matériaux employés et dans leur mise en œuvre : un atout qui permet d'assurer la sécurité du bâti face au phénomène sismique, même en présence de certaines faiblesses constructives.

Bien qu'elle soit globalement assez élevée, la marge de manœuvre peut, toutefois, varier entre les différents procédés constructifs ; ceux basés sur des systèmes porteurs verticaux à ossature sont représentatifs de cette variabilité.

Pour les ossatures avec remplissage en maçonnerie, une bonne performance sismique est souvent atteinte même dans les cas d'une qualité d'exécution médiocre (Langenbach 2009). Un constat similaire avait déjà été formulé en 1894 après le tremblement de terre d'Istanbul, quand le directeur de l'Observatoire d'Athènes en charge de l'étude des dégâts nota que, si les constructions en ossature bois ont généralement très bien résisté, celles de qualité médiocre ne se sont en tout cas pas effondrées (Şahin Güçhan 2007).

Il en est autrement pour les ossatures de bois qui ne présentent pas de remplissage mais un parement extérieur, comme celles répandues en Italie du Sud (appelées *baraccate*). Il a été constaté qu'une construction de ce type peut résister à des séismes très violents, tandis qu'une autre, réalisée avec moins de soin, peut s'écrouler même soumise à des sollicitations sismiques de moindre puissance (Fabrizio 1933).

L'idée que le premier de ces deux procédés présente une marge de manœuvre supérieure est renforcée par la diverse implication des corps de métiers pendant leur édification. Lorsque les remplissages étaient réalisés avec des matériaux formant un corps stable, comme dans le cas d'une maçonnerie, les compétences des maçons étaient souvent considérées comme suffisantes pour la réalisation de l'ensemble du bâti, ossature en bois comprise (Casanovas et al. 2002). En revanche, dans les cas où les remplissages étaient absents ou mis en œuvre avec des matériaux déformables, l'implication d'un charpentier s'avérait nécessaire ; celui-ci devant maîtriser « *parfaitement l'ajustement des assemblages, les divisions des panneaux et leurs pièces de contreventement en bois* » (Ibid., p.8).

En raison du lien étroit entre les différents types de structures et les compétences nécessaires pour leur réalisation, la marge de manœuvre peut être perçue comme un des aspects ayant pu déterminer la plus ou moins grande diffusion territoriale des procédés constructifs vernaculaires, ainsi que leur reproduction plus ou moins prolongée dans le temps¹⁴⁷. Si dans un contexte non assujéti aux tremblements de terre, la marge de manœuvre permise par un procédé constructif revêt une importance relative, en zone sismique, elle devient par contre cruciale, car elle peut augmenter la vulnérabilité de l'environnement bâti, notamment dans les cas où les marges de sécurité sont déjà réduites au minimum en raison des ressources économiques limitées. Ceci peut expliquer le constat effectué auparavant relativement à la récurrence dans les régions sismiques le long de la chaîne alpino-himalayenne, d'architectures en maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois en forme d'échelle (*type 2*) et d'architectures à ossature bois de section réduite avec remplissage en maçonnerie (*type 12*). Celles-ci, en plus d'assurer une certaine garantie en cas de séisme, semblent en effet tolérer un certain niveau d'imperfection dans l'exécution, autrement dit, elles se caractérisent par une tolérance aux défauts de mise en œuvre.

¹⁴⁷ L'influence de la marge de manœuvre dans la diffusion d'un type de structure doit, toutefois, être relativisée au cas par cas, en considérant également d'autres facteurs d'ordre économique ou relatifs au confort intérieur.

2.2.3. EFFICACITÉ TECHNOLOGIQUE ET VIABILITÉ SOCIÉTALE

Par rapport à ces éléments, on peut entériner l'idée que les types de structures qui présentent un gage de sécurité face aux phénomènes sismiques, et dont le procédé se caractérise par une marge de manœuvre élevée, sont l'aboutissement de cultures constructives non seulement technologiquement fiables, mais également viables. En effet, elles semblent avoir pris en compte l'efficacité des pratiques en cas d'événement sismique et, simultanément, les éventuelles impossibilités et/ou déficiences circonstancielles susceptibles de compromettre leur performance.

La viabilité de ces structures met en évidence une de leurs principales différences avec celles qui sont très répandues de nos jours dans les régions assujetties aux tremblements de terre comme, par exemple, l'ossature en béton armée avec remplissage en maçonnerie. Bien que ce type de constructions soit technologiquement contrôlé et, en soi, très efficace face à ces phénomènes, l'effondrement de bâtiments ainsi réalisés a été souvent constaté lors d'événements sismiques récents (Gülhan & Güney 2000; D'Ayala et al. 2003; Langenbach 2009). Leur mauvais comportement structural est à rapporter notamment à la basse qualité des matériaux mis en œuvre et à des défauts d'exécution ; leur vulnérabilité doit donc être attribuée, en premier lieu, à la marge de manœuvre particulièrement réduite des procédés corrélés.

Les structures vernaculaires qui présentent le double caractère « fiable/viable » peuvent donc être perçues comme la manifestation de cultures du risque évoluées et maîtrisées, combinant efficacement des facteurs d'ordre structural à des questions étroitement liées aux spécificités des contextes. Elles portent des enseignements utiles tant sur le plan technique, en raison de leur fiabilité envers le risque sismique, qu'au niveau de l'approche ayant régi leur élaboration qui, de fait, permet d'assurer leur fiabilité même dans des contextes critiques où les capitaux font défaut.

3. LE BÂTI : CONCRÉTISATION DE CHOIX CONSTRUCTIFS CORRÉLÉS AU FACTEUR SÉISME

Les procédés constructifs vernaculaires sont reliés à des facteurs économiques (tels que l'accessibilité aux matériaux de construction et aux compétences spécifiques) et socioculturels (comme les échanges entre les sociétés) ainsi qu'à l'environnement naturel, source première de matières à bâtir et, simultanément, cause possible de destruction des ouvrages réalisés. En combinant le bois, la pierre et la terre, les bâtisseurs ont mis au point des types de structures dont la bonne performance, démontrée à maintes reprises, repose sur des approches constructives et/ou des particularités structurelles se rapportant à des caractéristiques parasismiques précises. L'ingéniosité des bâtisseurs vernaculaires se reflète dans la grande variété des artefacts composant les environnements bâtis anciens des zones sismiques : des maçonneries avec des insertions horizontales aux ossatures avec ou sans remplissage, en passant par des murs associés à des structures en bois.

Une telle hétérogénéité souligne l'importance d'une prise en compte approfondie des spécificités propres à chaque type de structure, dans l'examen de la vulnérabilité sismique des environnements bâtis. En outre, elle met en exergue l'intérêt de reconnaître les corrélations entre les caractéristiques du bâti et l'activité sismique de sites particuliers, en vue de dégager les particularités structurelles susceptibles d'avoir été élaborées et adoptées par les bâtisseurs vernaculaires pour augmenter la résilience des ouvrages ; particularités qui peuvent, de ce fait, exercer une incidence marquée sur leur comportement dynamique.

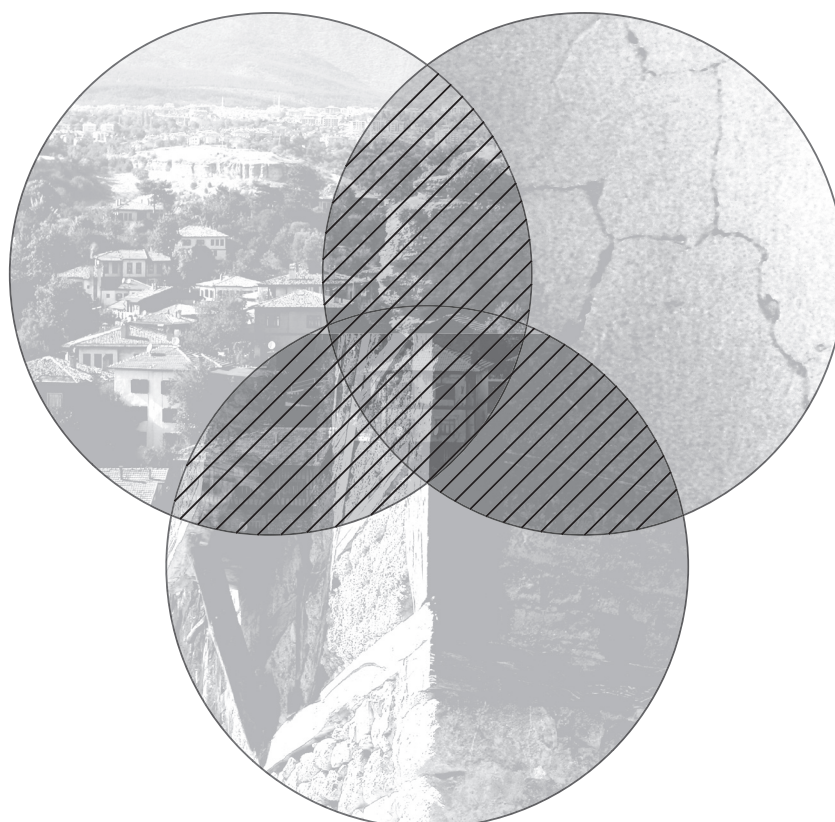
Dans cette optique, la recherche de thèse intègre un cas d'étude particulier où l'environnement bâti vernaculaire est considéré en tant que concrétisation de choix constructifs étroitement corrélés au *facteur séisme*. Plus précisément, le bâti est ici examiné en tant que témoin de solutions constructives adaptées à la sismicité historique des lieux, donc à la puissance et à la fréquence des tremblements de terre s'étant produits au fil des siècles.

L'étude de cas effectuée en relation à cette partie se focalise ainsi sur des domaines d'analyse découlant du croisement des thématiques suivantes (tab.9) :

- les « types de structures » et, en particulier, les spécificités des systèmes porteurs verticaux des architectures ayant démontré un caractère parasismique ;
- le « phénomène sismique », considéré en tant que sismicité historique d'un lieu, c'est-à-dire la puissance et la fréquence des événements sismiques qui l'ont affecté au cours des siècles passés ;
- le « territoire », entendu comme zone géographiquement élargie avec un niveau de risque sismique globalement élevé, mais dont la sismicité historique peut considérablement varier entre ses différents sites.

Territoire

Phénomène
sismique



Types de
structures

Tab.9 Schéma des domaines d'analyse principaux (surface hachurée) découlant du croisement des trois thématiques considérées pour l'étude de cas de cette partie.

ÉTUDE DE CAS :

SPÉCIFICITÉS DU BÂTI ET SISMICITÉS HISTORIQUES

- TERRITOIRE DE LA FAILLE NORD ANATOLIENNE, TURQUIE -

4. INTRODUCTION

Cette étude se focalise sur les particularités structurelles présentes dans le bâti vernaculaire qui sont susceptibles d'avoir été élaborées par les bâtisseurs en vue d'améliorer la résilience de leurs ouvrages. Pour ce faire, elle s'intéresse au lien entre les propriétés des environnements bâtis et les sismicités historiques des lieux, à travers un examen de la récurrence et de la diffusion territoriale des particularités structurelles ainsi qu'une mise en évidence des diversités constructives caractérisant des ouvrages avec des systèmes porteurs verticaux similaires.

4.1. LOCALISATION

La zone géographique considérée correspond à la partie septentrionale de la Turquie, plus précisément, au territoire le long de la faille nord anatolienne s'étendant sur approximativement 1'000 kilomètres. Les 31 sites ruraux et urbains visités peuvent être regroupés en quatre régions selon leur localisation : Ouest¹⁴⁸, Centre Ouest¹⁴⁹, Centre Est¹⁵⁰ et Est¹⁵¹.

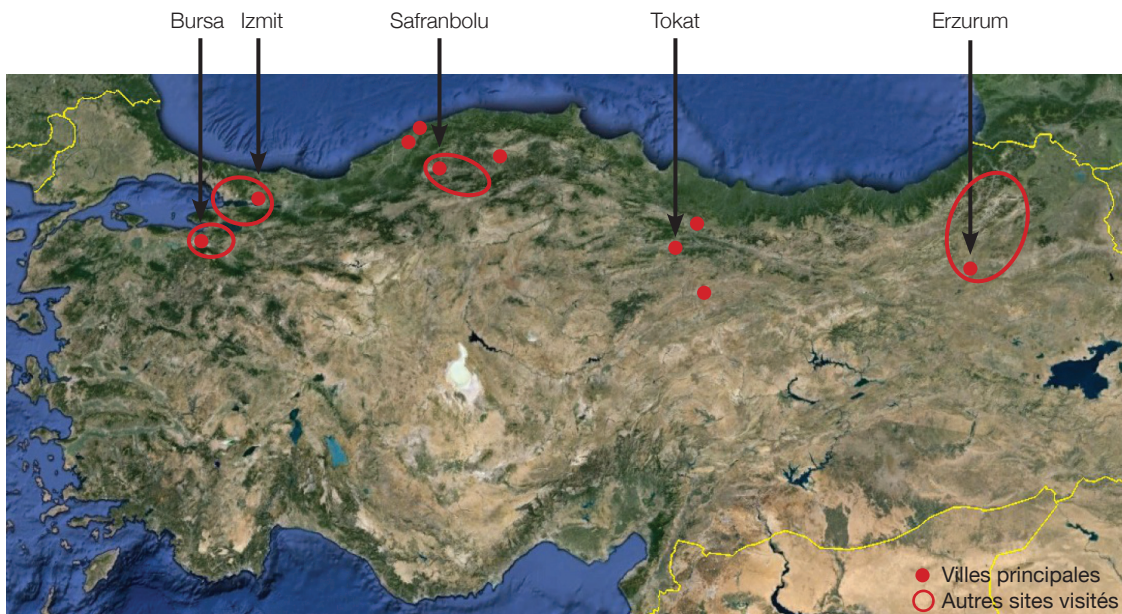


Fig.72 Localisation : Carte du territoire de la Turquie indiquant l'emplacement des sites considérés (Source: Google Earth).

148 Sites visités dans la région Ouest : Izmit, Gölcük, Değirmendere, Tavşancıl, Saraylı (province de Kocaeli, région de Marmara) ; Bursa, Cumalıkızık, Narlıca, Söğüt (province de Bursa, région de Marmara).

149 Sites visités dans la région Centre Ouest : Amasra, Bartın (province de Bartın, région de la mer Noire) ; Kastamonu (province de Kastamonu, région de la mer Noire) ; Safranbolu, Bağcılar, Çerçen, Kadıbüyük, Konarı, Üçbölük, Yazıköy, Yörük Köyü (province de Karabük, région de la mer Noire).

150 Sites visités dans la région Centre Est : Sivas (province de Sivas, région de l'Anatolie centrale) ; Tokat, Niksar (province de Tokat, région de la mer Noire).

151 Sites visités dans la région Est : Erzurum, Usk, Tortum, Ormanağzi, Derecapı, Çamlıyamaç, Bağbaşı (province d'Erzurum, région de l'Anatolie orientale) ; Yusufeli (province d'Artvin, région de la mer Noire).

4.1.1. CARACTÉRISTIQUES DE L'ACTIVITÉ SISMIQUE

Deux aspects propres à ce territoire en font un cas très particulier d'un point de vue sismique. D'une part, la zone géographique le long de la faille nord anatolienne coïncide à une des régions de la chaîne alpino-himalayenne où se sont produits, au cours du XX^e siècle, le plus grand nombre de tremblements de terre ayant provoqué d'importants dégâts sur le bâti, soit approximativement 50¹⁵². Simultanément, elle se caractérise par un risque sismique particulièrement élevé, et cela au sein d'un pays où les tremblements de terre représentent des phénomènes qui, si pris dans leur globalité, sont très fréquents : en effet, 91% de la Turquie se trouve dans une zone sismiquement active (Korkmaz et al. 2010).

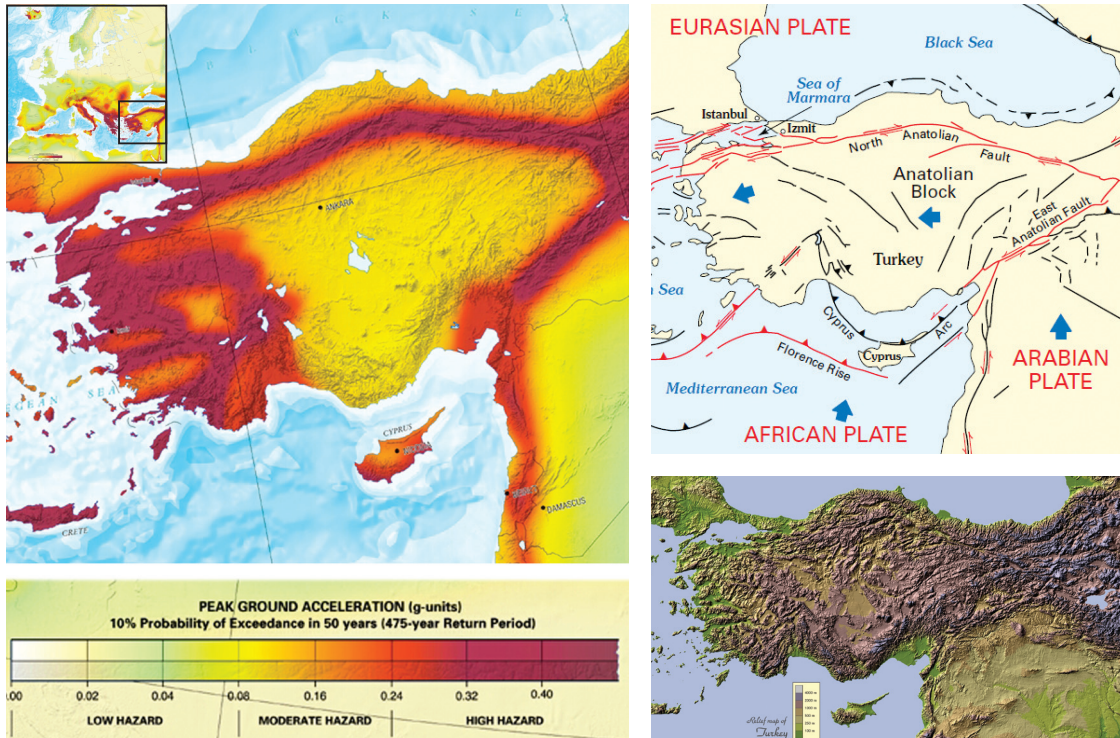


Fig.73 Carte du risque sismique en Turquie indiquant les valeurs de l'accélération maximale du sol pouvant survenir sur une période de 475 ans (Crédit : Giardini, Jiménez & Grunthal).

Fig.74 Cartes des failles actives (a, Crédit : USGS) et du relief du territoire turque (b, Source : www. treehouse-maps.com).

Afin de saisir les variations dans l'activité sismique du territoire considéré, une sismicité historique indicative a été définie pour chaque région (tab.10). Celle-ci se réfère à la puissance des séismes (soit la magnitude), à la fréquence de ces événements (en particulier, ceux avec magnitude supérieure à 5) ainsi qu'à leur intensité sismique (déterminée en fonction de l'étendue des dégâts induits sur le bâti)¹⁵³. L'intervalle temporel considéré pour déterminer la sismicité historique coïncide avec la période qui va du début du XIX^e siècle jusqu'à fin 2011 ; ce choix a découlé du fait que les constructions vernaculaires les plus anciennes datent, dans la très grande majorité, du XVIII^e siècle (Ahunbay et al. 2014).

Les sismicités historiques des quatre régions seront mentionnées tout au long de cette section consacrée à l'étude de cas, afin de les mettre en rapport avec les caractéristiques observées du bâti. Des constats généraux peuvent toutefois être formulés ici afin d'évoquer le nombre et la puissance des événements sismiques auxquels le bâti ancien a vraisemblablement dû faire face au cours du temps :

¹⁵² Source : Centre National américain de traitement de Données Géophysiques (NGDC).

¹⁵³ Les renseignements relatifs à la puissance, à la fréquence et à l'intensité sismique des tremblements de terre ont été extraits d'un catalogue comprenant les événements sismiques qui ont eu lieu dans le passé récent et lointain, élaboré par le NGDC et accessible à l'adresse internet www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1.

- Puissance et fréquence

Les régions Ouest et Est se caractérisent par une sismicité historique particulièrement élevée, tant en relation à la fréquence qu'au niveau de la puissance des événements passés. Dans la région Ouest, 22 tremblements de terre se sont produits avec une magnitude supérieure à 5, plus précisément, entre 5 et 8. Ceux ayant eu lieu dans la région Est sont au nombre de 26 ; leurs puissances sont réparties entre magnitude 5 et 7. Dans les deux autres régions, situées dans la partie centrale du territoire considéré, la fréquence des séismes avec magnitude supérieure à 5 a été très inférieure : 6 dans la région Centre Ouest, 5 dans la région Centre Est. Cependant, dans cette dernière, la puissance a été supérieure que celle des phénomènes s'étant produits dans la première : presque tous les séismes ont eu une magnitude entre 7 et 8, tandis que dans l'autre les valeurs de la magnitude mesurée se situent entre 6 et 7.

- Intensité sismique

Par rapport aux intensités sismiques documentées à l'occasion de ces événements, dans la région Ouest, plus de la moitié des 22 séismes ont eu une intensité équivalente à X¹⁵⁴, indiquant qu'une destruction généralisée a eu lieu au sein de l'environnement construit. Dans la région Est, la moitié des 26 séismes ont été d'intensité VIII, c'est-à-dire que les bâtiments présentaient des dommages légers s'ils étaient particulièrement bien construits et des dégâts très importants dans les autres cas. En revanche, dans les deux régions centrales, les intensités sismiques mesurées ont été beaucoup plus variables et étalées : entre un niveau VII, indiquant que les dégâts étaient faibles ou modérés dans les bâtiments bien construits mais considérables dans les autres, et un niveau XI, ce qui signifie que très peu de bâtiments ont résisté aux secousses.



Région Ouest	Région Centre Ouest	Région Centre Est	Région Est
22 séismes avec M > 5	6 séismes avec M > 5	5 séismes avec M > 5	26 séismes avec M > 5
Les magnitudes des séismes se distribuent entre 5 et 8 et l'intensité sismique de la plupart d'entre eux est équivalente à X	La magnitude de la plupart des séismes est de 6 ou 7 et leurs intensités sismiques se distribuent entre VII et X	La plupart des séismes a une magnitude de 7 ou 8 et leurs intensités sismiques se distribuent entre VIII et XI	La plupart des séismes a une magnitude entre 5 et 7 et l'intensité sismique de nombreux d'entre eux est équivalente à VIII
Puissance (M) •••	Puissance (M) •	Puissance (M) ••	Puissance (M) •••
Intensité sismique (MMI) •••	Intensité sismique (MMI) ••	Intensité sismique (MMI) •	Intensité sismique (MMI) ••
Fréquence (séismes avec M>5) ••	Fréquence (séismes avec M>5) •	Fréquence (séismes avec M>5) •	Fréquence (séismes avec M>5) •••
Légende : M = Magnitude mesurée ou estimée ; MMI = Echelle Mercalli modifiée (I-XII) ; • Modéré ; •• Elevé ; ••• Très élevé			

Tab.10 Sismicité historique indicative des quatre régions considérées.

154 L'échelle de l'intensité sismique prise comme référence correspond à l'échelle de Mercalli modifiée (MMI) se structurant en 12 degrés, de I à XII, en ordre croissant.

4.1.2. CARACTÉRISTIQUES DU BÂTI CONSIDÉRÉ

Les architectures composant les environnements bâtis de l'ensemble des sites visités sont très variées et se réfèrent étroitement à l'accessibilité aux matériaux de construction. Ainsi, les structures à ossature bois caractérisent surtout le bâti situé à proximité de forêts, alors que dans les sites plus arides ce sont plutôt des systèmes porteurs verticaux en maçonnerie de pierre ou en briques de terre crue qui ont été mis en œuvre.

L'analyse de terrain s'est focalisée sur les architectures correspondant à trois types de structures particuliers parmi ceux qui ont été identifiés comme ayant un caractère parasismique (cf. partie II, chap. 1.3.) :

maçonnerie avec insertions
horizontales en bois



ossature en bois
avec remplissage



maçonnerie avec éléments
horizontaux et verticaux en bois



Fig.75 Systèmes porteurs verticaux considérés.

Les deux premiers types de structures coïncident avec ceux qui sont les plus répandus dans les régions sismiques le long de la chaîne alpino-himalayenne, alors que les constructions du troisième type sont globalement plus rares.

De nos jours, les procédés constructifs associés à ces architectures ne sont plus utilisés de manière ordinaire et spontanée par les populations locales pour la réalisation de nouveaux bâtiments, et ce depuis approximativement un demi-siècle. Néanmoins, ils sont à nouveau considérés pour les interventions visant la réparation de constructions affectées par des événements sismiques, la restauration de celles en mauvais état, ou encore pour la rénovation intégrale de bâtiments abandonnés. De tels projets sont toutefois menés presque exclusivement par les institutions publiques.

4.2. MODES D'INVESTIGATION SUR LE TERRAIN

L'activité principale sur place a consisté dans l'étude des particularités structurelles présentes dans l'environnement bâti des quatre régions, le long de la faille nord anatolienne. Au total, environ 350 constructions ont été considérées, en procédant dans la plupart des cas à un examen conduit depuis l'extérieur du bâtiment ; lorsque l'accès a été possible, celui-ci s'est accompagné par des observations de la structure depuis son intérieur. Les aspects considérés pour l'analyse du bâti vernaculaire (cf. annexe 2.1.) ont été établis sur la base des paramètres de référence indiqués dans le recueil dénommé *World Housing Encyclopedia* : une collection de fiches qui décrivent les pratiques constructives (vernaculaires et non) des régions sismiques du monde entier¹⁵⁵. L'intention n'a pas été d'examiner en détail les architectures d'un village particulier, ou d'une ville donnée, mais plutôt de reconnaître la variation des aspects constructifs entre les différents sites. Ce travail de terrain a conduit à la constitution d'un corpus documentaire (photographies, données quantitatives et qualitatives) se référant aux trois types de structures sélectionnés ; ce qui a permis de formuler des hypothèses quant à la corrélation entre les caractéristiques du bâti et les sismicités historiques des lieux.

L'investigation sur place s'est appuyée également sur deux autres activités : des échanges avec les habitants et des entretiens avec des représentants des institutions publiques travaillant dans la gestion du patrimoine culturel architectural, en particulier l'historien de l'art Volkan Şenel, du bureau de la Direction des Sites Historiques de la Municipalité Métropolitaine de Kocaeli.

¹⁵⁵ Ce recueil est le résultat d'un projet développé par l'institut EERI (*Earthquake Engineering Research Institute*) et l'association IAEE (*International Association for Earthquake Engineering*) ; accessible à l'adresse www.world-housing.net/.

5. ELÉMENTS ÉMERGENTS

Dans le territoire situé le long de la faille nord anatolienne, les bâtiments dont le système porteur vertical se compose de murs en maçonnerie avec des insertions horizontales en bois sont présents avec une répartition variée. Dans les régions Ouest et Centre Ouest, ce procédé constructif est très répandu mais presque exclusivement pour les étages inférieurs, les étages supérieurs étant réalisés en ossature de bois. Des bâtiments édifiés entièrement en maçonnerie avec des insertions horizontales sont assez rares, à l'exception du centre historique de la ville d'Erzurum (région Est) où de nombreuses habitations de 2 ou 3 niveaux ont été réalisées intégralement de cette manière. Par rapport à la nature de la maçonnerie, dans les deux régions occidentales, les briques de terre crue et la pierre sont employées en proportion quasiment équivalente, tandis que dans les deux autres régions un seul matériau prédomine : la terre crue dans la région Centre Est et la pierre à l'Est.

Les architectures à ossature bois avec remplissage ont été identifiées dans les quatre régions considérées. Dans les régions Ouest, Centre Ouest et Centre Est, elles sont globalement très répandues, tandis que dans la région Est, elles le sont surtout en zone rurale. La nature du remplissage des ossatures varie fortement entre les sites. Les briques de terre cuite et de terre crue sont employées dans les régions Ouest ainsi que dans les deux régions centrales. Dans ces dernières, l'emploi de rondins en bois est également diffus, tandis que la pierre est mise en œuvre en tant que remplissage surtout dans les régions Centre Ouest et Est.

Le procédé constructif consistant à intégrer dans la maçonnerie des éléments en bois aussi bien dans le sens horizontal que vertical a été adopté principalement pour les murs du rez-de-chaussée, les étages supérieurs étant généralement constitués d'une ossature. Les bâtiments ainsi réalisés sont très peu répandus : ils ont été identifiés avec une fréquence faible-moderée dans les deux régions occidentales, presque nulle dans les deux autres.

Au-delà de ces remarques d'ordre général, des commentaires plus précis peuvent être avancés sur les facteurs de corrélation entre les caractéristiques de ces constructions et la sismicité historique des sites. Pour ce faire, on procède, ci-après, à une description détaillée des particularités identifiées en relation aux trois types de structures considérés, en mettant en évidence celles qui sont susceptibles d'exercer une incidence marquée sur le comportement dynamique du bâti.

5.1. ARCHITECTURES EN MAÇONNERIE AVEC INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS

Région Ouest	Région Centre Ouest	Région Centre Est	Région Est
Sismicité historique : ●●● Diffusion : ●●	Sismicité historique : ● Diffusion : ●●	Sismicité historique : ●● Diffusion : ●	Sismicité historique : ●●● Diffusion : ●●●
			
			
Hauteur des murs : 2 niv. Matière de la maçonnerie : Terre crue et pierre	Hauteur des murs : 1 niv. Matière de la maçonnerie : Terre crue et pierre	Hauteur des murs : 2 niv. Matière de la maçonnerie : Terre crue	Hauteur des murs : 2 niv. Matière de la maçonnerie : Pierre
Légende : ● Modéré ; ●● Elevé ; ●●● Très élevé			

Tab.11 Niveau de diffusion des architectures en maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois dans les quatre régions, avec indication sur la hauteur des murs et sur la matière de la maçonnerie.

5.1.1. PARTICULARITÉS STRUCTURELLES & SISMICITÉS HISTORIQUES

MAÇONNERIES : ENTRE PIERRES ET BRIQUES DE TERRE CRUE

Dans les maçonneries en briques de terre crue, celles-ci ont été toujours mises en place avec un mortier de terre et régulièrement appareillées en trois ou quatre rangées ; leur épaisseur varie entre 40 et 50 cm. Dans les maçonneries en moellons ou en pierres de taille, et qui sont hourdées avec un mortier de terre, de ciment ou à la chaux, l'épaisseur est plus importante, entre 50 et 80 cm. Le type d'appareillage le plus répandu correspond au double mur avec un blocage au milieu constitué d'un mélange de cailloux et mortier (fig.76a,b). Dans ces cas, très souvent des pierres en boutisses traversantes relient ponctuellement les deux parements. Avec un autre type d'appareillage, qui est toutefois beaucoup plus rare, des pierres de dimensions différentes sont disposées de manière plus homogène dans l'épaisseur du mur (fig.76c,d). Au sein de l'environnement bâti des sites avec une sismicité historique élevée, des pierres de taille sont disposées aux coins des bâtiments et autour des ouvertures, selon la technique du harpage, avec plus de soin que dans des lieux moins sismiques (fig.77).



Fig.76 Maçonneries en moellons : a,b) Double mur avec blocage (Centre Ouest) et schéma en coupe ; c,d) Mur avec disposition homogène des pierres (Est) et schéma en coupe.



Fig.77 Pierres d'angles : a) Schéma de la technique du harpage ; Chaîne d'angle avec pierres bien taillées (b, Est) ou avec pierres de forme irrégulière (c, Centre Ouest).

INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS EN FORME D'ÉCHELLE

Dans le cas d'insertions horizontales en bois en forme d'échelle, deux tasseaux longitudinaux à section carrée ou rectangulaire sont connectés par des traverses disposées tous les 60-80 cm. La dimension de ces éléments en bois peut varier d'une construction à l'autre (entre 8 et 15 cm) mais elle est généralement inchangée au sein d'un même bâtiment.

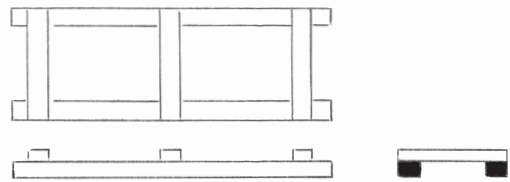


Fig.78 Schéma : échelle en plan, élévation et section.

La présence de ces insertions se révèle essentielle pour la stabilité globale du système porteur vertical ; non seulement elles assument la fonction de linteau en cas de chute de portions de mur sous-jacentes, mais elles garantissent également la stabilité d'une façade en cas de forte inclinaison hors plan (fig.80a). En outre, si de graves défaillances se produisent aux angles du bâtiment, leur emploi permet d'assurer une connexion entre les murs orthogonaux suffisante pour éviter leur écoulement global (fig.80b). Ces insertions permettent aussi d'arrêter les fissures, qui restent confinées dans un segment horizontal de la maçonnerie réduisant ainsi le risque de dissociation du mur sur toute la hauteur (fig.80c).



Fig.79 Tasseaux longitudinaux et traverses de connexion : a) Vue transversale (Est) ; b) Vue latérale (Ouest) ; c) Vue depuis le haut (Ouest).



Fig.80 Contribution des insertions horizontales à la stabilité des bâtiments : a) En cas d'inclinaison du mur (Ouest) ; b) En cas de défaillances aux angles (Est) ; c) En cas de fissuration (Centre Est).

Dans les régions où la pratique d'intégrer ce type d'insertions horizontales dans la maçonnerie est très répandue et où, parallèlement, la sismicité historique est très élevée, des éléments verticaux en bois y sont parfois associés, en correspondance des dernières assises de la maçonnerie au-dessous de la toiture ou du plancher (fig.81a). Ils sont fixés sur la face extérieure du mur ou placés entre les tasseaux longitudinaux. Dans certains bâtiments de la ville d'Erzurum (région Est), ceux-ci ont été disposés également à côté et/ou au-dessous des ouvertures (fig.81b,c).



Fig.81 Eléments verticaux en bois : a) Entre les tasseaux longitudinaux (Ouest) ; b) À côté des ouvertures (Est) ; c) Au-dessous des fenêtres (Est) ; d) Schéma : axonométrie indiquant leur emplacement dans les bâtiments.

L'utilisation de ces éléments verticaux a été constatée principalement dans les sites où la récurrence des événements sismiques avait pu favoriser une compréhension approfondie, de la part des bâtisseurs, quant aux mécanismes de rupture auxquels les murs en maçonnerie sont le plus exposés. Ils coïncident, en fait, avec des dispositifs permettant de limiter le risque de renversement des unités maçonnées, notamment dans les parties supérieures.

INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS EN FORME DE PLANCHE OU DE FEUILLET

À la différence des insertions en forme d'échelle, dans le cas des planches, les éléments en bois occupent toute l'épaisseur de la maçonnerie. Si une seule planche n'est pas suffisante, plusieurs d'entre elles sont juxtaposées et reliées par des éléments supplémentaires transversaux. Pareillement aux insertions en forme d'échelle, les planches endiguent de manière efficace les fissures qui se génèrent dans le mur (fig.83b).

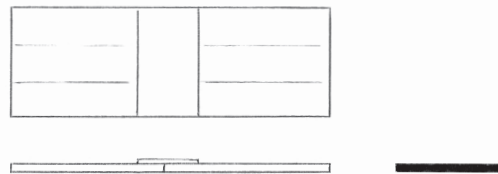


Fig.82 Schéma : planche en plan, élévation et section.

En général, ce sont des planches relativement rigides de 2-4 cm d'épaisseur qui sont employées : une certaine rigidité est, de fait, nécessaire afin qu'elles puissent aussi assumer le rôle de linteau, en évitant ainsi l'effondrement du mur en cas de défaillances des parties inférieures (fig.83c). Cette capacité à garder en place la maçonnerie est fondamentale pour assurer la stabilité du système porteur vertical comme également pour assurer la liaison entre murs orthogonaux.



Fig.83 Planches en bois rigides : a) Plusieurs éléments juxtaposés (Centre Ouest) ; b) Efficacité dans l'interruption de fissures diagonales dans les maçonneries en briques (Centre Ouest) ; c) Fonction de linteau évitant l'écroulement de la maçonnerie en cas d'érosion des briques de terre crue (Centre Ouest).

Pourtant, les insertions en bois sont dans certains cas extrêmement minces, approximativement 0.1 cm d'épaisseur. L'utilisation de ces feuillets a été repérée uniquement dans la ville de Safranbolu (région Centre Ouest) située dans une zone historiquement moins concernée par des tremblements de terre puissants. Assez difficiles à percevoir, ces insertions ondulent et se déforment selon la conformation des unités de la maçonnerie.

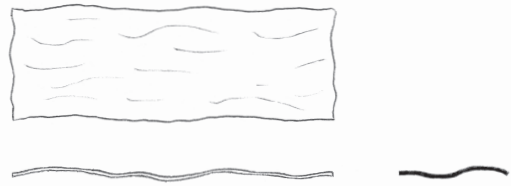


Fig.84 Schéma : feuillet en plan, élévation et section.

Une hypothèse quant à leur rôle est qu'elles permettraient de créer des plans de glissement à l'intérieur du mur, ce qui réduit le risque de renversement de la maçonnerie, au moins lors d'événements sismiques de puissance modérée. Leur réelle contribution reste toutefois inconnue aujourd'hui : aucune référence à ce type d'insertions n'a été identifiée dans la littérature consultée, et ceci malgré qu'elles caractérisent le bâti vernaculaire d'une ville inscrite sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO.



Fig.85 Feuillet en bois très minces : a) Dans la maçonnerie en briques de terre crue (Centre Ouest) ; b) Dans la maçonnerie en moellons (Centre Ouest).

INSERTIONS HORIZONTALES, SISMICITÉS HISTORIQUES ET TYPES D'APPAREILLAGE DE LA MAÇONNERIE

Par rapport à une éventuelle corrélation entre les différents types d'insertions horizontales identifiés et la sismicité historique des sites où elles ont été employées, on peut noter que l'utilisation d'échelles plutôt que de planches semblerait avoir un lien avec la périodicité des tremblements de terre. En effet, dans les sites où se sont produits le plus grand nombre de tremblements de terre depuis le début du XIX^e siècle (régions Ouest et Est), les insertions horizontales en bois sont en forme d'échelle, tandis que dans les sites où leur fréquence a été inférieure (régions Centre Ouest et Centre Est), ce sont généralement des planches qui ont été les plus employées. Un constat fait par l'historien d'architecture Auguste Choisy fournit des renseignements précieux quant à l'origine possible de cette corrélation. En se référant à l'architecture byzantine, il déclara que si, d'une part, les planches étaient très avantageuses « *car un mur ainsi coupé transversalement par des arases [...] résistera mieux qu'un mur où tout est maçonnerie* », d'autre part, elles « *étaient trop peu durables* » (Choisy 1883, p.117). Les insertions en forme d'échelle sont, de fait, plus durables car, à la différence des planches, elles ne constituent pas des plans favorisant la stagnation de l'eau à l'intérieur du mur, susceptible d'accélérer leur dégradation. Elles pourraient donc correspondre à une solution adoptée en particulier dans les régions où la résistance mécanique du bois a été mise à l'épreuve par les tremblements de terre avec davantage de fréquence et régularité au cours du temps.

Les propriétés des insertions horizontales semblent également avoir un lien étroit avec le type d'appareillage des murs. Dans les maçonneries de pierre avec des insertions en forme d'échelle, les espaces entre les moellons ne sont pas systématiquement bouchés avec des cailloux (fig.86a) ; particularité qui est en revanche très répandue dans les murs possédant des planches relativement minces (fig.86c). La présence d'échelles permettrait, en fait, de réaliser une maçonnerie avec une densité moindre, sans, toutefois, que sa stabilité en soit compromise de manière importante.

De plus, le constat que les échelles sont rarement associées à des maçonneries composées par des moellons occupant de manière homogène toute la section, peut être mis en rapport avec le fait qu'elles permettent d'augmenter considérablement la résistance des maçonneries du type double mur, plus simples et moins onéreuses à mettre en œuvre. Cependant, c'est très probablement avec le premier

type de maçonnerie que l'efficacité sismique du procédé constructif est augmentée ; variante qui a, d'ailleurs, été observée exclusivement dans la ville d'Erzurum (région Est), site se caractérisant par une sismicité historique parmi les plus marquées.



Fig.86 Appareillage de la maçonnerie en moellons : a) Nombreux espaces entre les unités maçonnées, en présence d'insertions en forme d'échelle (Ouest) ; b) Schéma de cette variante du mur en élévation; c) Verouillage des moellons avec des cailloux dans les murs comprenant des planches minces (Centre Ouest) ; d) Schéma de cette variante du mur en élévation.

EMPLACEMENTS DES INSERTIONS HORIZONTALES

Les insertions horizontales sont presque toujours placées aux niveaux du plancher, de la toiture et de l'appui des fenêtres. Si elles sont mises en place en plus grand nombre, leur emplacement s'accorde à celui des ouvertures ; elles assument alors la fonction de linteau, en particulier dans les bâtiments qui se distinguent par une bonne qualité d'exécution. Globalement, l'espacement vertical entre les insertions en forme d'échelle peut varier de 40 cm à 100 cm, tandis que dans le cas des planches il est généralement plus étendu, jusqu'à 150 cm.

La variabilité dans la manière avec laquelle les éléments en bois ont été mis en œuvre par les bâtisseurs vernaculaires laisse présager l'existence d'un intervalle vertical optimal se référant à une utilisation minimale du bois et, conjointement, au niveau local de sismicité. De fait, dans les sites historiquement moins sismiques, la distance verticale entre les insertions horizontales mesure, dans la plupart des cas, entre 70 et 150 cm (fig.87b,c), tandis que dans les sites qui ont été affectés par des tremblements de terre plus puissants, cet intervalle est beaucoup plus réduit : entre 40 et 100 cm. Dans la ville d'Erzurum (région Est), endroit où les constructions en maçonnerie comprenant des insertions en forme d'échelle sont les plus répandues et où la fréquence des tremblements de terre a été la plus élevée parmi les quatre régions considérées, l'espacement entre les insertions est particulièrement restreint, entre 40 cm et 70 cm (fig.87d). Par ailleurs, c'est dans ce site particulier que, parfois, l'intervalle vertical des insertions varie en fonction de l'épaisseur de la maçonnerie : dans certains bâtiments, il diminue vers le haut de manière graduelle avec la réduction de l'épaisseur du mur¹⁵⁶ (fig.88).



Fig.87 Emplacement des insertions horizontales : a) En correspondance des ouvertures (Ouest) ; b,c) Avec un espacement vertical important (Centre Ouest) ; d) Avec un espacement réduit (Est).

¹⁵⁶ Dans un bâtiment de deux étages, l'épaisseur de la maçonnerie de pierre peut diminuer d'un tiers, du bas vers le haut.



Fig.88 Réduction progressive de l'espacement vertical entre les insertions dans les parties supérieures du bâtiment : a) Schémas en élévation et section ; b,c) Variation dans un mur en moellons (Est).

INTERCONNEXION ENTRE STRUCTURE ET ARCHITECTURE

Au-delà des rôles que les insertions horizontales assument dans la résistance d'un ensemble bâti, elles ont aussi des autres fonctions, comme celle de plaque de répartition des charges transmises par les systèmes porteurs horizontaux (fig.89a) ou d'élément d'appui pour les jambes de force soutenant les parties saillantes (fig.89b). Elles permettent également la création de parties de mur en porte-à-faux, notamment aux angles des bâtiments situés à l'intersection de ruelles (fig.89c). Ces différents rôles reflètent la complexité structurelle sous-jacente aux ouvrages réalisés avec ce procédé constructif particulier ; d'où la difficulté à saisir avec exactitude la manière dont les charges gravitationnelles sont transmises au sol en situation ordinaire, ainsi que leur comportement en cas d'événement sismique.



Fig.89 Autres fonctions assumées par les insertions horizontales : a) Schéma indiquant le rôle des insertions comme plaque de répartition des charges gravitationnelles transmises par les solives ; b) Appui pour les jambes de force (Ouest) ; c) Réalisation de parties du mur en porte-à-faux (Centre Ouest).

ASSEMBLAGES ORDINAIRES ET EXTRAORDINAIRES

Dans les cas des insertions en planches, les liaisons sont réalisées par simple chevauchement et par clouage. Avec celles en forme d'échelle, les assemblages entre les éléments longitudinaux s'effectuent par le biais de joints à mi-bois ou en biseau. Ici, la taille des clous est supérieure de celle des clous employés pour les planches, et aux angles les liaisons sont généralement accomplies avec des joints à mi-bois.



Fig.90 Assemblages ordinaires : a) Sovrapposition des planches (Centre Ouest) ; b) Raccordement à mi-bois (Ouest) ; c) Joint en biseau (Ouest) ; d) Assemblage d'angle à mi-bois (Ouest).

Dans les régions qui ont été affectées par des tremblements de terre puissants, certains bâtiments présentent des assemblages d'angle à queue d'aronde (fig.91a,b) ; particulièrement résistants aux forces de traction, ils permettent d'éviter le déplacement latéral des éléments en bois, grâce à la seule pression exercée par la maçonnerie.

Les liaisons entre les tasseaux longitudinaux et les traverses de connexion sont réalisées par simple clouage ou avec un joint à mi-bois. Dans certains cas, plutôt rares, la résistance de l'assemblage envers des sollicitations perpendiculaires aux murs est améliorée par l'encastrement des éléments longitudinaux aux traverses (fig.91c,d).

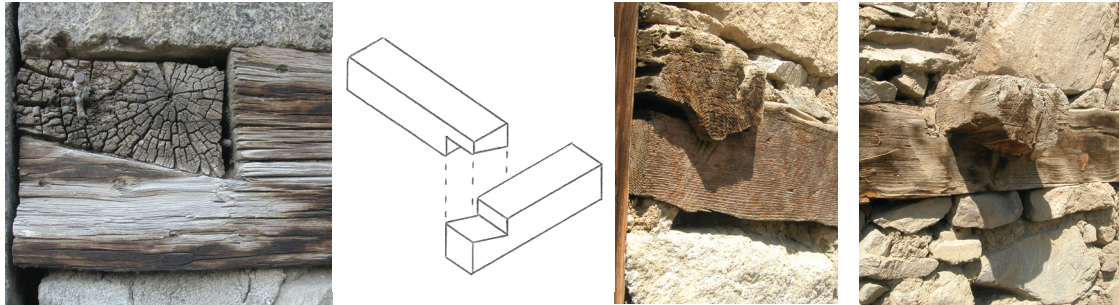
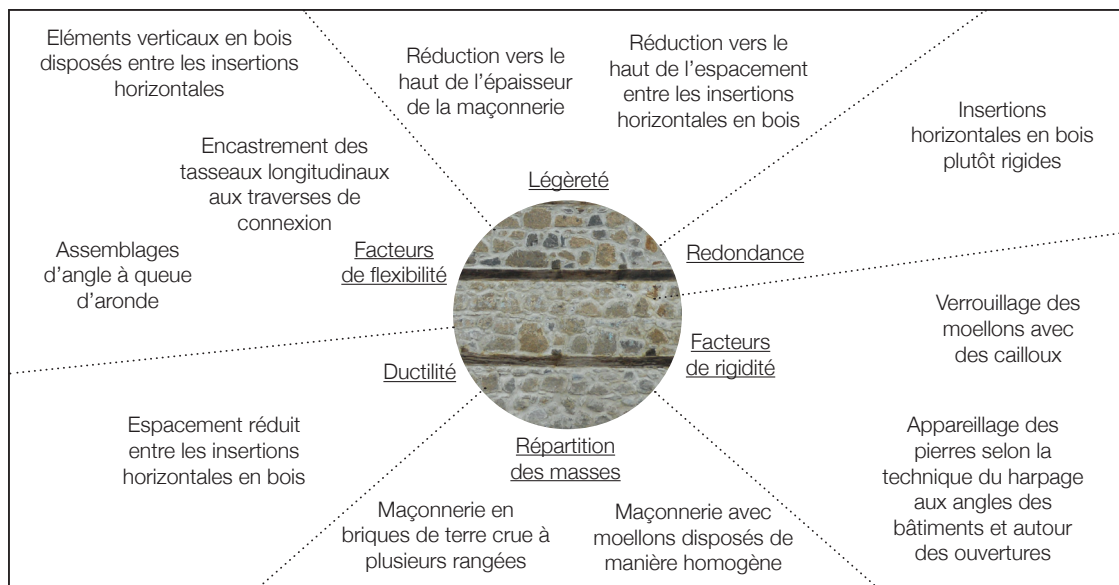


Fig.91 Assemblages spéciaux : a) Liaison d'angle à queue d'aronde entre deux tasseaux longitudinaux (Est) ; b) Schéma du joint d'angle ; c,d) Encastrement des tasseaux longitudinaux aux traverses de connexion (Est).

5.1.2. VARIANTES CONSTRUCTIVES

Sur la base de l'examen des bâtiments en maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois, il a été possible de repérer quelques-uns des facteurs d'ordre constructif qui varient entre les quatre régions se différenciant par leur sismicité historique. Notamment, ceux-ci se rapportent aux propriétés de la maçonnerie (type d'appareillage), à la forme et à l'épaisseur des insertions (échelles, planches ou feuillots), à leur intervalle vertical dans le mur (de 40 à 150 cm) ainsi qu'aux types de liaisons (tab.13). Parmi les variantes constructives qui ont été identifiées, certaines sont susceptibles d'avoir une incidence marquée sur la bonne performance des ouvrages en cas d'événement sismique. De fait, elles peuvent être associées aux 6 caractéristiques parasismiques¹⁵⁷ :



Tab.12 Variantes constructives et caractéristiques parasismiques : associations hypothétiques.

¹⁵⁷ Ici, l'intention n'est pas de récapituler l'ensemble des facteurs influençant le comportement dynamique des bâtiments, mais plutôt d'associer les particularités structurelles identifiées, et susceptibles d'être améliorées, aux 6 caractéristiques parasismiques présentées dans la section précédente (cf. partie II, chap. 2.1.). Cette remarque est également valable pour la description des particularités des architectures en ossature bois avec remplissage, effectuée en fin du prochain chapitre.





<p>REGION OUEST <i>Sismicité historique</i> ••• <i>Diffusion du type de structure</i> ••</p> <p><u>Maçonnerie</u> Briques de terre crue + Double mur en pierres ++ Mur plein en pierres - Harpage ++</p> <p><u>Insertions horizontales</u> Echelles ++ Planches - Feuillets -</p> <p><u>Liaison bois</u> Queues d'aronde - Encastrement entre tasseaux et traverses - Éléments verticaux supplémentaires +</p>	<p>REGION CENTRE OUEST <i>Sismicité historique</i> • <i>Diffusion du type de structure</i> ••</p> <p><u>Maçonnerie</u> Briques de terre crue + Double mur en pierres ++ Mur plein en pierres - Harpage -</p> <p><u>Insertions horizontales</u> Echelles + Planches ++ Feuillets ++</p> <p><u>Liaison bois</u> Queues d'aronde - Encastrement entre tasseaux et traverses - Éléments verticaux supplémentaires -</p>
<p>REGION CENTRE EST <i>Sismicité historique</i> •• <i>Diffusion du type de structure</i> •</p> <p><u>Maçonnerie</u> Briques de terre crue + Double mur en pierres + Mur plein en pierres - Harpage ++</p> <p><u>Insertions horizontales</u> Echelles + Planches + Feuillets -</p> <p><u>Liaison bois</u> Queues d'aronde - Encastrement entre tasseaux et traverses - Éléments verticaux supplémentaires +</p>	<p>REGION EST <i>Sismicité historique</i> ••• <i>Diffusion du type de structure</i> •••</p> <p><u>Maçonnerie</u> Briques de terre crue + Double mur en pierres ++ Mur plein en pierres + Harpage ++</p> <p><u>Insertions horizontales</u> Echelles ++ Planches - Feuillets -</p> <p><u>Liaison bois</u> Queues d'aronde + Encastrement entre tasseaux et traverses + Éléments verticaux supplémentaires ++</p>
<p>Légende : - Non identifié ; + Identifié ; ++ Fréquent ; • Modéré ; •• Elevé ; ••• Très élevé</p>	

Tab.13 Récapitulatif des aspects constructifs variant entre les sites visités dans les quatre régions.



Fig.92 Architecture vernaculaire typique de la ville d'Erzurum (Est).

5.2. ARCHITECTURES À OSSATURE EN BOIS AVEC REMPLISSAGE

Région Ouest	Région Centre Ouest	Région Centre Est	Région Est
Sismicité historique : ●●● Diffusion : ●●●	Sismicité historique : ● Diffusion : ●●●	Sismicité historique : ●● Diffusion : ●●●	Sismicité historique : ●●● Diffusion : ●
			
Hauteur des parois : 3 niv. Matière du remplissage : Terre crue et terre cuite	Hauteur des parois : 3 niv. Matière du remplissage : Terre crue, pierre et bois	Hauteur des parois : 2 niv. Matière du remplissage : Terre crue et bois	Hauteur des parois : 2 niv. Matière du remplissage : Terre crue
Légende : ● Modéré ; ●● Elevé ; ●●● Très élevé			

Tab.14 Niveau de diffusion des architectures à ossature en bois avec remplissage dans les quatre régions, avec indication sur la hauteur des parois et sur la matière du remplissage.

5.2.1. PARTICULARITÉS STRUCTURELLES & SISMICITÉS HISTORIQUES

AGENCEMENT DES MONTANTS, DIAGONALES ET TRAVERSES

Les structures à ossature de bois présentent généralement une trame dont la dimension des modules primaires varie entre 1,50 et 3 mètres. Les montants, les diagonales et les traverses sont agencés selon des modalités variées. Dans certaines ossatures, on constate la prédominance de montants, très rapprochés les uns des autres, avec des traverses intégrées exclusivement aux niveaux de l'appui des fenêtres et du linteau (fig.93a). D'autres ossatures se caractérisent par une présence équilibrée de montants, diagonales et traverses (fig.93b). Ce deuxième type d'agencement est le plus diffus dans les sites avec une sismicité historique élevée ; ici, la présence d'un nombre de traverses et de diagonales proportionnel à celui des montants assure une capacité de déformation accrue de l'ossature et, parallèlement, réduit le risque de renversement du remplissage grâce à une dimension réduite des panneaux.



Fig.93 Trames des ossatures ; a) Prédominance de montants (Centre Ouest) ; b) Présence équilibrée de montants, diagonales et traverses (Ouest) ; c) Dimension réduite des panneaux de remplissage (Centre Ouest).

RAPPORT VARIABLE ENTRE L'OSSATURE BOIS ET LE REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE

Le rapport bois/remplissage varie non seulement entre les bâtiments se situant dans des régions avec une sismicité historique différente, mais il peut varier également entre ceux qui se trouvent dans des sites où celle-ci est similaire. Là où la sismicité est importante, l'ossature de certaines constructions est très dense, avec un rapport bois/remplissage d'environ 1 sur 5 (fig.94a), tandis que dans d'autres bâtiments la quantité de bois est extrêmement réduite par rapport à la surface globale de la façade, avec ce même rapport qui diminue jusqu'à approximativement 1 sur 20 (fig.94b). À propos de ce deuxième cas de figure, on peut se questionner s'il n'est pas plus pertinent de parler de maçonnerie chaînée par des éléments en bois plutôt que d'ossature avec remplissage ; en fait, si dans le premier cas la résistance statique du bâti repose principalement sur l'ossature (bien que le remplissage participe aussi à la transmission des charges), ici, la maçonnerie jouerait un rôle plus important.



Fig.94 Rapport bois/remplissage ; a) Environ 1 sur 5 (Ouest) ; b) Environ 1 sur 20 (Centre Est) ; c) Schémas : densité du bois dans les deux variantes.

Le rapport bois/remplissage peut varier même au sein d'un seul et même bâtiment ; les espacements de l'ossature du rez-de-chaussée sont alors beaucoup plus grands que ceux des étages supérieurs (fig.95b). Ce constat peut être mis en lien avec le fait que, dans les parties supérieures d'un bâtiment, une trame très serrée limite le renversement des panneaux de maçonnerie, risque le plus probable auquel ces parties sont exposées en cas de séisme. Parallèlement, la section des éléments en bois de l'ossature peut également varier d'un étage à l'autre. Dans ce cas, elle est plus importante dans les niveaux inférieurs (fig.95c) ; disposition qui, d'ailleurs, satisfait aux recommandations actuelles en génie parasismique admettant une rigidité croissante du contreventement depuis le haut du bâtiment vers le bas (Zacek 2004a).



Fig.95 Variation du rapport bois/remplissage dans un même bâtiment ; a) Schéma : différences entre les parties inférieures et supérieures dans un segment vertical de l'ossature ; b) Réduction progressive de la dimension des panneaux de remplissage vers le haut (Ouest) ; c) Augmentation de la section des éléments de l'ossature vers le bas (Ouest).

REPLISSAGE : ENTRE PIERRE, TERRE ET BOIS

En ce qui concerne la nature du remplissage des ossatures, les briques de terre cuite ou crue sont généralement appareillées à plat avec un mortier de terre ou à la chaux (plus rarement de ciment) et elles sont mises en œuvre en une seule rangée, ce qui confère aux panneaux une épaisseur très mince. Dans les ossatures avec une trame particulièrement dense, la manière de mettre en œuvre les unités maçonnées varie en fonction de l'espacement, par exemple, lorsque les éléments de subdivision sont très rapprochés, elles ont été parfois placées en oblique (fig.96a,b).

La pierre est rarement employée comme seul matériau de remplissage : cela a été constaté presque exclusivement dans les sites avec une sismicité historique modérée. Ailleurs, et notamment dans les sites avec une sismicité historique élevée, elle est utilisée principalement pour les niveaux inférieurs des constructions (fig.96c), ce qui, d'ailleurs, permet de baisser le centre de gravité de l'ensemble. Lorsque le remplissage est réalisé en bois, il se compose de rondins équarris disposés horizontalement (fig.96d) ou verticalement et, plus rarement, de rondins non écorcés. Ces éléments en bois sont coupés avec beaucoup de précision afin de s'adapter au mieux aux différents éléments de l'ossature entre lesquels ils sont disposés : chacun est donc travaillé en relation à son emplacement final.



Fig.96 Différents types de remplissage : a) Briques de terre cuite (Ouest) ; b) Briques de terre crue (Ouest) ; c) Pierre (Ouest) ; d) Rondins équarris (Centre Ouest).

Parmi les procédés de mise en œuvre de la terre, on peut identifier, en plus de la technique de la maçonnerie, celle du torchis (fig.97a) et de la terre coulée (Houben & Guillaud 1989). Cette dernière, consistant à couler une terre argileuse à l'état visqueux à l'aide de coffrages, a été identifiée uniquement dans les sites se caractérisant par une sismicité historique la moins intense (fig.97b). Un remplissage en terre coulée n'a, de fait, pas la même prédisposition que le torchis à résister aux sollicitations sismiques perpendiculaires à la façade, d'où un risque accru de renversement. Un constat analogue pourrait également être fait pour les remplissages en terre graveleuse (fig.97c) ; toutefois, dans ce cas, ce risque est considérablement réduit du fait que la terre est maintenue en place par les lattes qui ont été fixées sur les deux côtés de l'ossature en tant que coffrage perdu.



Fig.97 Différents types de remplissage en terre : a) Torchis (Ouest) ; b) Terre argileuse coulée à l'aide de coffrages (Centre Ouest) ; c) Terre graveleuse coulée entre des lattes (Est).

Globalement, il est très vraisemblablement afin de réduire l'instabilité des panneaux de remplissage que le matériau employé pour ces derniers est étroitement corrélé à la densité de l'ossature. Celle-ci est élevée avec la terre coulée, par contre, elle diminue considérablement avec, par exemple, des rondins en bois, moins susceptibles de se renverser.

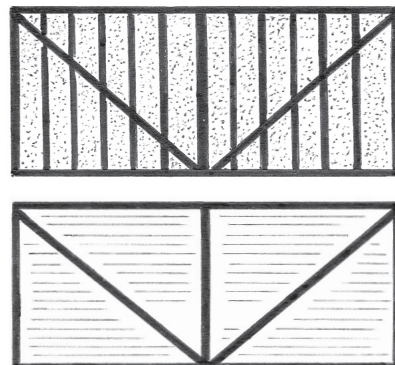


Fig.98 Schémas : densité des ossatures possédant des remplissages en terre coulée (a) ou en rondins (b).

CONFIGURATIONS DES DIAGONALES DE CONTREVENTEMENT

Trois types de contreventement sont les plus répandus : en forme de croix de St. André, de « Y renversé » ou de diagonales isolées. Leur utilisation est étroitement liée à la trame de l'ossature ainsi qu'à la présence d'ouvertures. Les diagonales en forme de croix, par exemple, sont employées principalement pour les cloisons intérieures, les parois aveugles et mitoyennes ainsi que pour les parties inférieures du bâtiment, possédant un nombre limité d'ouvertures (fig.99a,b). La difficulté à combiner ce type de contreventement avec le nombre élevé de fenêtres des étages supérieurs (caractéristique architecturale des maisons turques) fait que globalement il n'est pas très courant ; il est présent surtout dans les bâtiments situés dans des sites où les intensités sismiques mesurées lors des tremblements de terre du passé ont été particulièrement élevées.

À la différence du contreventement en forme de croix, celui en « Y renversé » est visible également sur les façades principales des bâtiments, surtout dans les angles et à côté des fenêtres (fig.99c). Les diagonales ainsi disposées sont probablement moins efficaces que celles en forme de croix mais ce type de contreventement peut toutefois s'avérer suffisant face à l'activité sismique locale. En effet, il est fréquent principalement dans les sites où la puissance des tremblements de terre historiques n'a pas été très élevée. Néanmoins, leur disposition aux angles des parois témoigne de l'attention portée par les bâtisseurs à renforcer les parties structurelles qui sont les plus sollicitées en cas de séisme. Ce choix satisfait du reste aux recommandations actuelles du génie parasismique qui spécifient que si le contreventement ne peut qu'être intégré dans une seule partie des façades, c'est aux angles des bâtiments qu'il est conseillé de l'inclure (Zacek 2004a).



Fig.99 Contreventement : a) En forme de X dans les parois intérieures (Ouest) ; b) En forme de X dans les façades latérales aveugles et au rez-de-chaussée (Ouest) ; c) En forme de « Y renversé » à côté des ouvertures (Centre Est).

Dans les deux régions où les diagonales en forme de « Y renversé » sont très répandues, on distingue une variation qui peut être mise en rapport avec la puissance des tremblements de terre s'étant produits au fil des siècles. Dans les sites où ces phénomènes ont été plus forts, l'élément diagonal relie toujours la sole basse à la sole haute (fig.100a) tandis que dans ceux où la puissance moyenne a été plus faible, très souvent l'élément diagonal s'appuie latéralement au montant sans vraiment atteindre le niveau de la sole haute (fig.100b). Avec cette deuxième variante, la diagonale risque de glisser et basculer en cas de sollicitations horizontales perdant ainsi sa fonction de contreventement de l'ossature. D'ailleurs, les traverses qui, dans certains bâtiments, ont été disposées exactement à cet endroit (fig.100c) peuvent être perçues comme une mesure limitant les problèmes pouvant découler d'un tel défaut, car elles permettent de stabiliser la diagonale.



Fig.100 Contreventement en forme de « Y renversé » : a) Avec diagonale liée à la sole haute (Centre Est) ; b) Avec diagonale s'appuyant au montant (Centre Ouest) ; c) Avec traverse stabilisant la diagonale (Centre Ouest) ; d) Schéma de la variante avec traverse.

Avec le troisième type de contreventement, des diagonales isolées sont intégrées à un système primaire de montants et traverses. Elles sont disposées très régulièrement et avec une continuité dans le plan vertical, notamment aux angles des bâtiments, spécialement dans les sites avec une sismicité historique importante (fig.101a). Il est intéressant de noter que dans la région qui a été affectée par des séismes d'une intensité particulièrement élevée (région Ouest), de nombreux bâtiments présentent des diagonales courbées (fig.101b,c). Quant à leur apport structurel en cas d'événement sismique, on peut s'interroger si l'emploi d'éléments courbes ne coïnciderait pas avec un choix constructif qui permet d'accroître la pression exercée sur les panneaux de remplissage lors de leur mise en œuvre, réduisant ainsi le risque de renversement. D'autre part, leur présence surtout aux extrémités latérales des parois peut aussi amener à supposer qu'elles aient pu être mises en œuvre pour augmenter la propension à fléchir des diagonales situées aux angles des bâtiments, généralement très sollicitées lors de secousses¹⁵⁸.



Fig.101 Diagonales de contreventement : a) Disposition régulière (Ouest) ; b) Diagonales courbées (Ouest) ; c) Bâtiment affecté par le violent tremblement de terre ayant eu lieu dans la province de Kocaeli en 1999 (Ouest) ; Schémas : pression exercée par la diagonale courbe sur la maçonnerie (d) et son probable mouvement lors de sollicitations horizontales (e).

ASSEMBLAGES ORDINAIRES ET EXTRAORDINAIRES

Les assemblages par entaille du bois sont les plus employés pour relier les soles basses de l'ossature aux solives du plancher, comme également pour connecter les soles aux montants et aux diagonales (fig.102a,b). Très souvent, la précision d'exécution des assemblages reliant les différents éléments de l'ossature varie au sein d'une même construction, spécialement dans des sites avec une sismicité historique très élevée ; en correspondance de certaines liaisons, elle est presque millimétrique, alors que dans d'autres, l'imprécision des entailles détermine un certain « jeu ». Cette variation permet de réduire le risque d'une rupture soudaine des connexions grâce aux petits déplacements qui peuvent avoir lieu dans l'ensemble de la paroi sollicitée (fig102c).



Fig.102 Assemblages ordinaires : a) Liaison entre sole basse et solive du plancher (Ouest) ; b) Liaison entre sole basse et diagonale (Ouest) ; c) Schéma : mouvements possibles en correspondance des assemblages.

Généralement, 2 à 4 clous sont utilisés pour chaque assemblage et leur taille est importante pour les éléments primaires, plus que pour les secondaires. Très souvent, les clous ont été enfoncés de manière croisée, notamment aux intersections des diagonales, ce qui permet d'augmenter la résistance des assemblages soumis à des charges multidirectionnelles.

¹⁵⁸ À ce propos, on peut faire une analogie avec les éléments courbes très répandus dans la charpente navale, qui doit, en fait, répondre à des importantes et constantes sollicitations dynamiques.

En plus des liaisons ordinaires par simple clouage ou à mi-bois cloué, dans les sites qui ont été affectés par des séismes particulièrement violents d'une magnitude se rapprochant à 8, certains bâtiments présentent des assemblages à queue d'aronde, plus résistants à la traction (fig.103a,b).

Dans ces mêmes sites, des longs chapiteaux sont souvent disposés entre les montants et la sole haute de l'ossature ; outre à rigidifier cette dernière, leur présence augmente la stabilité des parois en cas de renversement du remplissage (fig.103c).



Fig.103 Assemblages spéciaux : a,b) Joint à queue d'aronde (Centre Est, Est) ; c) Long chapiteau (Centre Est).

LIAISONS AU SOL

Le lien entre les ossatures en bois et le sol a été traité, dans la majorité des cas, par le biais de murets de soubassement en maçonnerie de pierre de hauteur variable, entre 20 et 100 cm (fig.104a)¹⁵⁹. Quand ceux-ci présentent des insertions horizontales en bois, leur hauteur peut mesurer jusqu'à 2 mètres (fig.104b). L'espacement entre ces éléments n'excède pourtant jamais 1 mètre ; cet intervalle vertical peut être mis en lien avec le constat que lorsque les soubassements ont une hauteur de plus de 1 mètre et ne possèdent pas d'insertions, des fissures sont souvent visibles dans la maçonnerie (fig.104c).



Fig.104 Soubassement en maçonnerie de pierre : a) Muret de faible hauteur (Centre Est) ; b) Soubassement de 2 mètres de hauteur comprenant des insertions horizontales en bois (Ouest) ; c) Soubassement sans insertions et présentant une fissure diagonale (Centre Est).

Il est intéressant de noter que dans les lieux où les ossatures bois sont très répandues et où la sismicité historique est très élevée (région Ouest), de nombreux bâtiments se caractérisent par la présence d'un vide sanitaire entre le plancher du rez-de-chaussée et le sol. Dans ces cas, la surélévation d'environ 1 mètre de hauteur est réalisée selon deux modalités : par le biais d'une maçonnerie de pierre de 100 cm d'épaisseur ou avec une structure en bois présentant un remplissage en briques ; dans ce deuxième cas, l'ossature se prolonge donc jusqu'au sol.

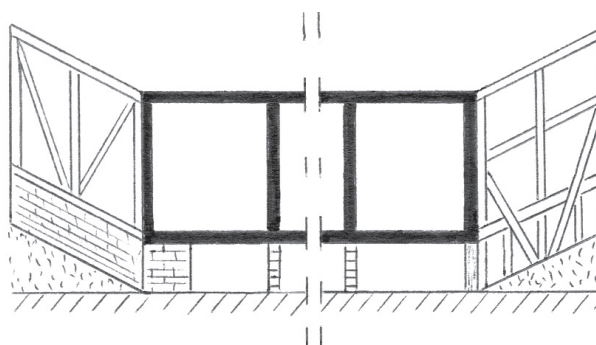


Fig.105 Schéma : deux modalités de réalisation du vide sanitaire, par un soubassement en maçonnerie (gauche) ou avec une structure en bois (droite).

¹⁵⁹ La profondeur des fondations mesure généralement environ 1 mètre.

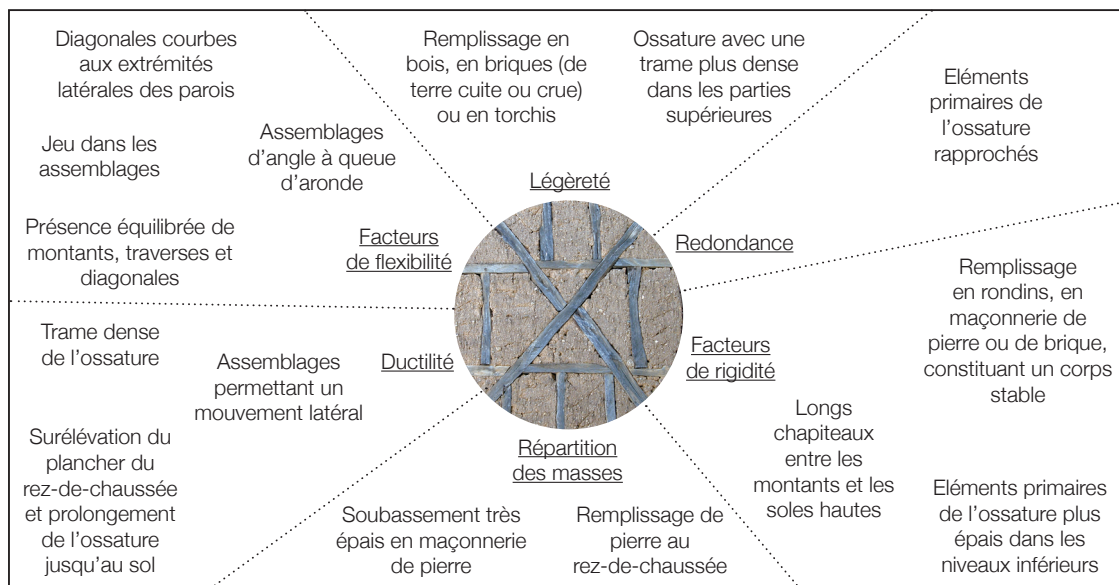
Des hypothèses peuvent être émises quant à l'apport de ces deux types de surélévation en cas d'événement sismique¹⁶⁰. Dans la première variante (fig.106a), la solidité de la maçonnerie très épaisse du soubassement ainsi que la présence de murets situés au niveau du sol au centre du bâtiment (en correspondance des cloisons intérieures) assureraient une certaine fermeté de l'ensemble. Dans l'autre variante (fig.106b), les forces auxquelles la superstructure doit faire face seraient réduites car une partie de l'énergie sismique se dissiperait au travers de la rupture des montants et des diagonales composant la partie de la surélévation¹⁶¹, ainsi que par le mouvement du remplissage de celle-ci ; des défaillances qui n'entraîneraient pourtant pas l'effondrement du bâtiment grâce aux murets supplémentaires placés sous le plancher du rez-de-chaussée.



Fig.106 Bâtiments avec vide sanitaire : a) Soubassement en maçonnerie de pierre (Ouest) ; b) Surélévation du plancher avec prolongement de l'ossature jusqu'au sol (Ouest).

5.2.2. VARIANTES CONSTRUCTIVES

Les aspects qui varient parmi les architectures à ossature bois situées dans des sites présentant des sismicités historiques différentes se réfèrent, surtout, à la nature du remplissage (matière et modalités de mise en œuvre), au type de contreventement (en forme de croix, de « Y renversé », de diagonales isolées), aux assemblages entre les éléments en bois ainsi qu'au lien entre les parois porteuses et le sol (tab.16). Parmi les variantes constructives identifiées, celles qui sont susceptibles d'avoir une influence particulièrement marquée sur la bonne performance du bâti peuvent être associées aux 6 caractéristiques parasismiques :



Tab.15 Variantes constructives et caractéristiques parasismiques : associations hypothétiques.

¹⁶⁰ En effet, nombreuses sont les constructions possédant un de ces deux types de surélévation à avoir eu un bon comportement à l'occasion du violent tremblement de terre qui a frappé la province de Kocaeli (Ouest) en 1999.

¹⁶¹ La rupture de ces éléments se produit en raison de la hauteur réduite de la surélévation par rapport à celle des niveaux du bâtiment, selon le soi-disant effet de poteau court (Zacek 2004a).






REGION OUEST	<i>Sismicité historique</i> ●●●			REGION CENTRE OUEST	<i>Sismicité historique</i> ●
	<i>Diffusion du type de structure</i> ●●●				<i>Diffusion du type de structure</i> ●●●
<u>Remplissage</u>	<u>Contreventement</u>			<u>Remplissage</u>	<u>Contreventement</u>
Briques de terre cuite ++	Croix ++			Briques de terre cuite +	Croix +
Briques de terre crue ++	Y renversés -			Briques de terre crue ++	Y renversés ++
Pierre +	Diagonales isolées ++			Pierre ++	Diagonales isolées +
Torchis +	Diagonales courbes ++			Torchis -	Diagonales courbes -
Terre coulée (argileuse) -				Terre coulée (argileuse) ++	
Terre coulée (graveleuse) -	<u>Lien parois-sol</u>			Terre coulée (graveleuse) -	<u>Lien parois-sol</u>
Rondins +	Soubassement sans vide sanitaire +			Rondins +	Soubassement sans vide sanitaire ++
<u>Liaison bois</u>	Soubassement avec vide sanitaire ++			<u>Liaison bois</u>	Soubassement avec vide sanitaire -
Entailles ++	Surélévation plancher et prolongement ossature +			Entailles +	Surélévation plancher et prolongement ossature -
Queues d'aronde +				Queues d'aronde -	
Chapiteaux ++				Chapiteaux -	
REGION CENTRE EST	<i>Sismicité historique</i> ●●			REGION EST	<i>Sismicité historique</i> ●●●
	<i>Diffusion du type de structure</i> ●●●				<i>Diffusion du type de structure</i> ●
<u>Remplissage</u>	<u>Contreventement</u>			<u>Remplissage</u>	<u>Contreventement</u>
Briques de terre cuite +	Croix +			Briques de terre cuite +	Croix +
Briques de terre crue ++	Y renversés +			Briques de terre crue ++	Y renversés -
Pierre -	Diagonales isolées ++			Pierre -	Diagonales isolées ++
Torchis -	Diagonales courbes -			Torchis -	Diagonales courbes -
Terre coulée (argileuse) -				Terre coulée (argileuse) -	
Terre coulée (graveleuse) -	<u>Lien parois-sol</u>			Terre coulée (graveleuse) +	<u>Lien parois-sol</u>
Rondins ++	Soubassement sans vide sanitaire ++			Rondins -	Soubassement sans vide sanitaire ++
<u>Liaison bois</u>	Soubassement avec vide sanitaire -			<u>Liaison bois</u>	Soubassement avec vide sanitaire -
Entailles ++	Surélévation plancher et prolongement ossature -			Entailles ++	Surélévation plancher et prolongement ossature -
Queues d'aronde +				Queues d'aronde +	
Chapiteaux ++				Chapiteaux ++	
Légende : - Non identifié ; + Identifié ; ++ Fréquent ; ● Modéré ; ●● Elevé ; ●●● Très élevé					

Tab.16 Récapitulatif des aspects constructifs variant entre les sites visités dans les quatre régions.



Fig.107 Architecture vernaculaire typique du village de Sölöz (Ouest).

5.3. ARCHITECTURES EN MAÇONNERIE AVEC ÉLÉMENTS HORIZONTAUX ET VERTICAUX EN BOIS

Région Ouest	Région Centre Ouest	Région Centre Est	Région Est
Sismicité historique : ●●● Diffusion : ●●	Sismicité historique : ● Diffusion : ●	Sismicité historique : ●● Diffusion : -	Sismicité historique : ●●● Diffusion : -/●
		?	
		?	?
Hauteur des murs : 2 niv. Matière de la maçonnerie : Terre crue et pierre	Hauteur des murs : 1 niv. Matière de la maçonnerie : Terre crue et pierre	Hauteur des murs : - Matière de la maçonnerie : -	Hauteur des murs : 1 niv. Matière de la maçonnerie : Pierre
Légende : - Non identifié ; -/● Un seul cas ; ● Modéré ; ●● Elevé ; ●●● Très élevé			

Tab.17 Niveau de diffusion des architectures en maçonnerie comprenant des éléments horizontaux et verticaux en bois dans les quatre régions, avec indication sur la hauteur des murs et sur la matière de la maçonnerie.

5.3.1. UN CAS HYBRIDE

Certaines architectures vernaculaires se particularisent par leur système porteur vertical double ; dans ces cas, la résistance repose non seulement sur des murs en maçonnerie (en moellons ou en briques de terre crue) mais également sur une structure en bois qui leur a été intégrée. L'épaisseur de ce type de mur est largement inférieure à celle des maçonneries possédant des insertions en bois uniquement dans le sens horizontal : elle mesure entre 30 et 40 cm.

Les éléments horizontaux et verticaux en bois constituent dans leur ensemble une structure de confinement retenant la maçonnerie. Les montants sont placés avec un écartement assez régulier, de 2 à 4 mètres, et sont fixés aux soles basses et hautes ainsi qu'à la poutre sablière de la charpente. Les insertions horizontales sont en forme d'échelle ou elles correspondent à des planches rigides d'épaisseur variable entre 2 et 4 cm. Dans le premier cas, les deux tasseaux longitudinaux sont cloués aux montants tandis que les planches ne sont pas fixées. Des diagonales sont parfois employées, notamment aux extrémités latérales des murs.

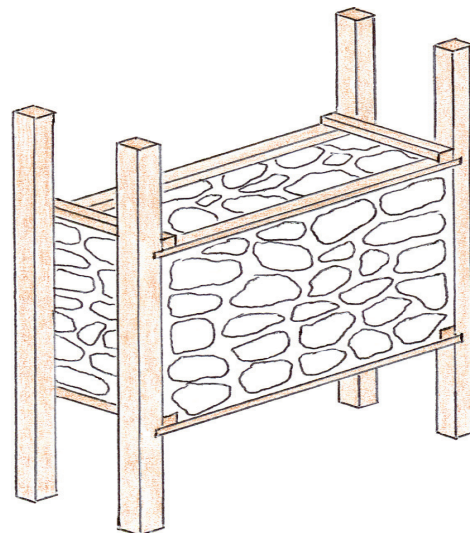


Fig.108 Schéma d'un module de l'ensemble maçonnerie-bois composant le système porteur vertical.



Fig.109 Spécificités propres aux maçonneries avec éléments horizontaux et verticaux en bois (Ouest) : a,b) Module très régulier ; c) Pierres maintenues en place par la structure en bois ; d) Plancher soutenu par les montants, en cas de défaillances dans la maçonnerie.

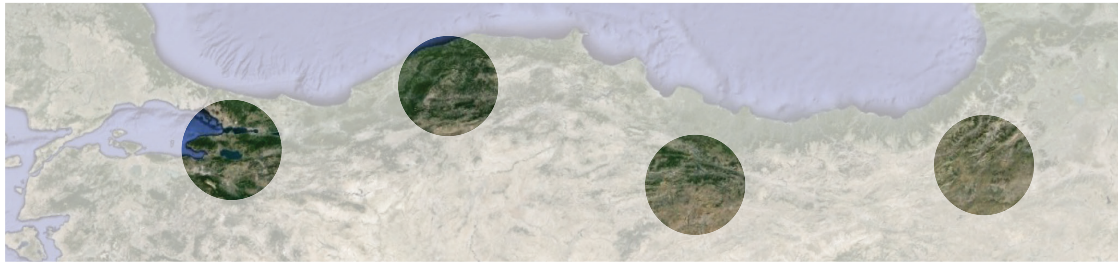
Bien que ce procédé constructif ait été dans la plupart des cas adopté pour les murs du rez-de-chaussée (fig.110a), en raison des avantages qu'il offre, il a été également employé pour d'autres parties structurelles. Il permet notamment la réalisation d'étages avec des maçonneries de masse réduite (fig.110b) ainsi qu'un renforcement de la liaison verticale entre les parois en ossature des niveaux supérieurs et les murs sous-jacents (fig.110c). Par ailleurs, la combinaison dans un même ouvrage de plusieurs procédés constructifs souligne la maîtrise des bâtisseurs à tirer profit des qualités que chacun de ceux-ci possèdent.



Fig.110 Utilisation ponctuelle du procédé constructif au sein des bâtiments : a) Au rez-de-chaussée (Ouest) ; b) Pour les niveaux supérieurs, en alternance avec des parois à ossature bois (Ouest) ; c) En correspondance de la liaison verticale entre des murs en maçonnerie et l'ossature des étages (Centre Ouest).

5.3.2. DIFFUSION CIRCONSCRITE

Globalement, sur les 372 bâtiments observés dans les sites visités le long de la faille nord anatolienne, ceux qui correspondent à ce type de structure sont très peu nombreux en comparaison des constructions associables aux deux autres types : seuls 32 bâtiments, contre 147 pour ceux en maçonnerie comprenant des insertions horizontales et 193 pour ceux à ossature bois avec remplissage (tab.18). Ces 32 bâtiments ont été identifiés avec une fréquence sensiblement variable d'une région à l'autre : modérée dans la région Ouest (16 %), faible dans celle Centre Ouest (6 %), presque nulle dans les deux autres régions orientales.



Région Ouest	Région Centre Ouest	Région Centre Est	Région Est
130 bâtiments considérés	155 bâtiments considérés	48 bâtiments considérés	39 bâtiments considérés
Ossature bois avec remplissage 52 %	Ossature bois avec remplissage 51 %	Ossature bois avec remplissage 92 %	Ossature bois avec remplissage 5 %
Maçonnerie avec insertions horizontales 32 %	Maçonnerie avec insertions horizontales 43 %	Maçonnerie avec insertions horizontales 8 %	Maçonnerie avec insertions horizontales 92 %
Maçonnerie associée avec une structure en bois 16 %	Maçonnerie associée avec une structure en bois 6 %	Maçonnerie associée avec une structure en bois 0 %	Maçonnerie associée avec une structure en bois 3 %

Tab.18 Récapitulatif des 372 bâtiments considérés dans les 31 sites visités.

Le constat indiquant que ce type de structure, se distinguant par un système porteur vertical double, est répandu surtout dans la région Ouest, où se situent 21 des 32 cas identifiés, peut amener à formuler une considération d'ordre général sur les possibles facteurs qui ont pu orienter les choix des bâtisseurs dans le développement et l'adoption des mesures de protection.

Non seulement le niveau d'intensité des tremblements de terre semble avoir joué un rôle décisif sur la diffusion des particularités structurelles parasismiques au sein de l'environnement bâti vernaculaire mais, de plus, il semble avoir également eu une incidence marquée sur la variété des procédés constructifs mis en œuvre. De fait, la région Ouest non seulement est l'une des deux régions (avec celle de l'Est) qui a subi le plus grand nombre de tremblements de terre depuis le XIX^e siècle (au total 22 séismes d'une magnitude supérieure à 5), mais elle correspond aussi à la région dans laquelle leurs intensités sismiques ont été les plus élevées : plus de la moitié des séismes a eu un niveau d'intensité équivalent à X, indiquant que de nombreuses constructions se sont effondrées.

Ainsi, un degré de destruction de l'environnement architectural particulièrement élevé aurait incité les bâtisseurs à élaborer plusieurs procédés constructifs afin d'accroître les possibilités de parvenir à des solutions efficaces d'un point de vue de la résistance sismique, et cela en considérant aussi d'autres aspects comme le confort intérieur et le coût. En fait, dans le cas des maçonneries comprenant des éléments en bois intégrés aussi bien dans le sens horizontal que vertical, les avantages d'un système à ossature sont associés de manière ingénieuse à ceux d'un système en maçonnerie. Ils se caractérisent par une certaine flexibilité permettant de dissiper une grande quantité d'énergie sismique, tout en évitant que des mouvements excessifs se produisent grâce au caractère rigide de la maçonnerie. Simultanément, ce procédé permet de réaliser des constructions possédant une bonne inertie thermique, tout en utilisant une quantité limitée de matériaux.

5.3.3. RÉINTERPRÉTATION CONTEMPORAINE

C'est très probablement aussi en raison de ces qualités qu'aujourd'hui ce procédé constructif est l'objet d'une réinterprétation pour la réalisation d'ouvrages *ex novo*.

À ce propos, il est intéressant de constater que des modifications sont, toutefois, apportées dans la manière de disposer les éléments en bois. Dans les architectures vernaculaires, ceux-ci ont été placés en suivant une trame très régulière, basée sur un module qui définit la longueur des murs et l'emplacement des ouvertures dans la façade (fig.111a). En revanche, dans une nouvelle construction en cours de réalisation dans le village de Cumalikzık (région Ouest), leur disposition est déterminée par l'emplacement des ouvertures (fig.111b) : ici, c'est donc la conception architecturale qui règle la disposition des éléments structuraux. Cette version contemporaine, qui permute la logique adoptée par les bâtisseurs vernaculaires, met bien en évidence les avantages que ce procédé constructif offre sur le plan structurel, comme notamment la possibilité de réaliser des murs massifs présentant des grandes ouvertures. Cependant, si la bonne performance sismique des ouvrages vernaculaires a été attestée lors de tremblements de terre lointains et récents¹⁶², la résilience des nouvelles constructions ainsi édifiées reste encore à être éprouvée.

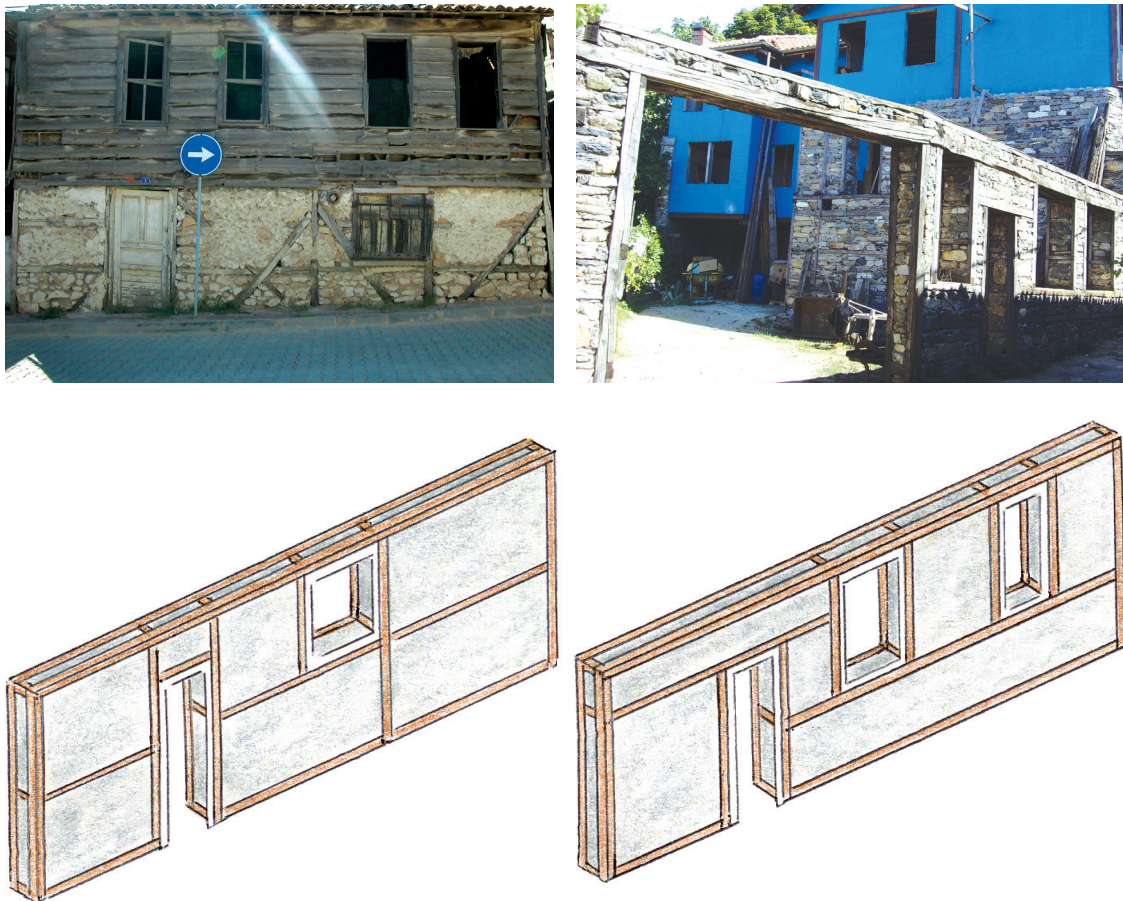


Fig.111 Variation dans la mise en oeuvre du procédé constructif entre les bâtisseurs vernaculaires et les constructeurs contemporains ; a) Trame régulière de la structure en bois d'un bâtiment vernaculaire (Ouest) ; b) Trame irrégulière d'un nouveau bâtiment en construction (Ouest) ; c,d) Schémas explicitant la diverse corrélation entre la disposition des éléments en bois et l'emplacement des ouvertures, dans les ouvrages vernaculaires (gauche) et plus récents (droite).

¹⁶² Par exemple, à l'occasion du séisme qui a frappé la province de Kocaeli (Ouest) en 1999.

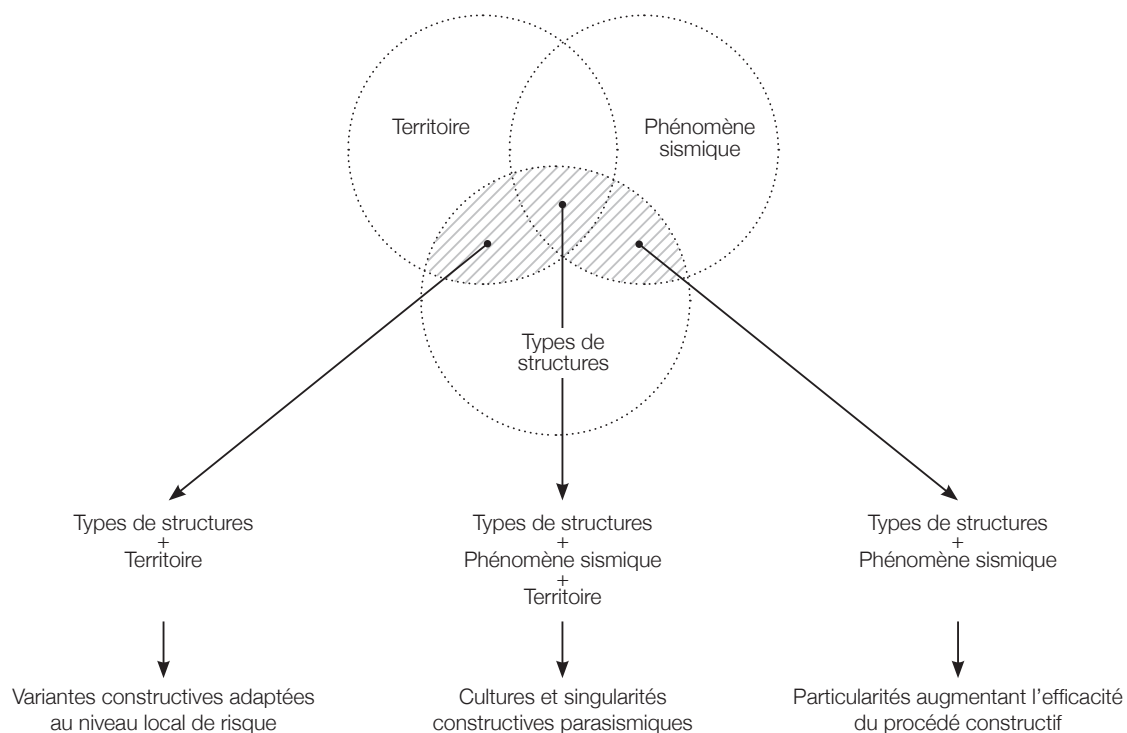
SYNTHÈSE

6. REDÉCOUVRIR LES TYPES DE STRUCTURES PARASISMIQUES

En guise de conclusion, des remarques de synthèse sont formulées en se référant à la thématique principale traitée dans cette partie : les spécificités des systèmes porteurs verticaux des architectures vernaculaires (« types de structures »). Ces considérations sont mises en lien direct avec les deux autres sujets examinés dans l'étude de cas : les variations architecturales dans une zone géographiquement élargie (« territoire ») et les sismicités historiques des lieux (« phénomène sismique ») (tab.19) :

- l'analyse des bâtiments correspondant à un même type de structure dans des lieux avec une sismicité historique similaire permet l'identification des variantes constructives les plus susceptibles d'être adaptées au niveau local de risque ;
- l'examen des variations entre les architectures réalisées avec un même procédé constructif et situées dans des sites avec une sismicité historique hétérogène permet de mettre en évidence les particularités structurelles qui, vraisemblablement, augmentent l'efficacité de ce procédé ;
- l'étude du niveau de diffusion des différents types de structures et de leurs variantes dans un territoire étendu permet d'identifier les particularités structurelles qui sont représentatives de cultures constructives ou, au contraire, de singularités constructives, susceptibles de posséder un caractère parasismique.

Ces trois aspects sont exposés de manière approfondie ci-après, afin de préciser les intérêts présentés par une redécouverte des « types de structures parasismiques », c'est-à-dire des architectures qui se sont avérées être adaptées à la sismicité locale.



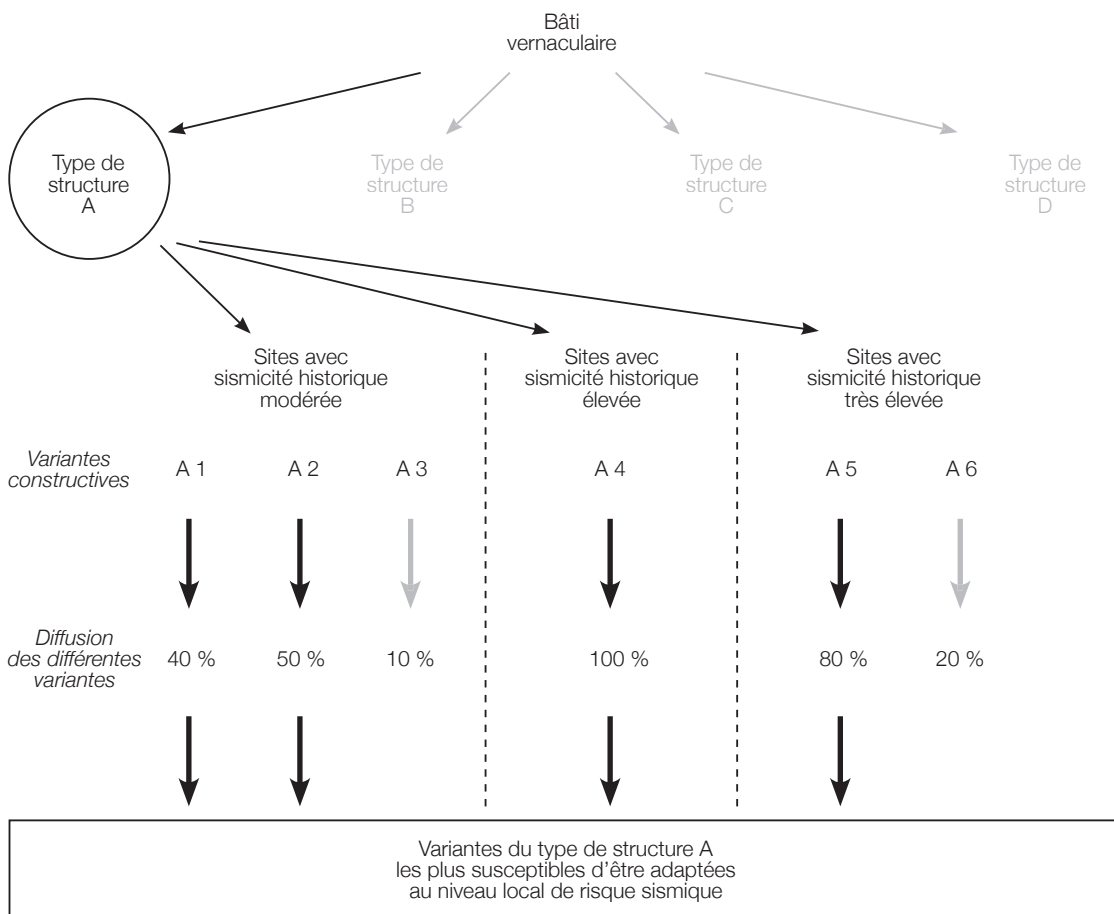
Tab.19 Schéma de synthèse des aspects se rapportant aux trois domaines d'analyses considérés.

6.1. VARIANTES CONSTRUCTIVES ADAPTÉES AU NIVEAU LOCAL DE RISQUE

Parmi les ouvrages présentant un système porteur vertical similaire, il existe plusieurs variantes en ce qui concerne les matériaux et les propriétés de la structure. Elles peuvent être reconnues en comparant le bâti de zones géographiquement très éloignées mais également en examinant les constructions situées dans un territoire plus restreint, dans des sites d'une même région, voire dans un même village.

Globalement, il y a toujours des variantes constructives qui sont prépondérantes. Si on se réfère au territoire le long de la faille nord anatolienne, on remarque que dans certains sites la plupart des bâtiments à ossature se caractérisent par une densité accrue de diagonales et traverses, alors que, dans d'autres endroits, le type d'ossature le plus répandu se compose presque exclusivement d'une série de montants très rapprochés. En fonction du niveau d'hétérogénéité architecturale, la prédominance d'une variante peut être évidente ou, au contraire, beaucoup plus difficile à cerner.

Reconnaître le degré de diffusion des variantes constructives d'un type de structure constitue une démarche qui peut apporter des renseignements utiles pour effectuer une première différenciation entre les bâtiments possédant des niveaux de vulnérabilité divergents. En effet, les variantes les plus répandues dans des sites avec une sismicité historique similaire sont indicatives des types de bâtiments susceptibles de résister à des tremblements de terre de puissance équivalente à ceux ayant eu lieu, au fil des siècles, dans ces mêmes endroits. Bien qu'une telle corrélation entre le bâti et la sismicité du passé ne constitue pas une garantie de sécurité face à d'éventuels événements sismiques plus violents, ces variantes constructives peuvent, toutefois, être comprises comme étant celles qui sont les plus adaptées au niveau local de risque.



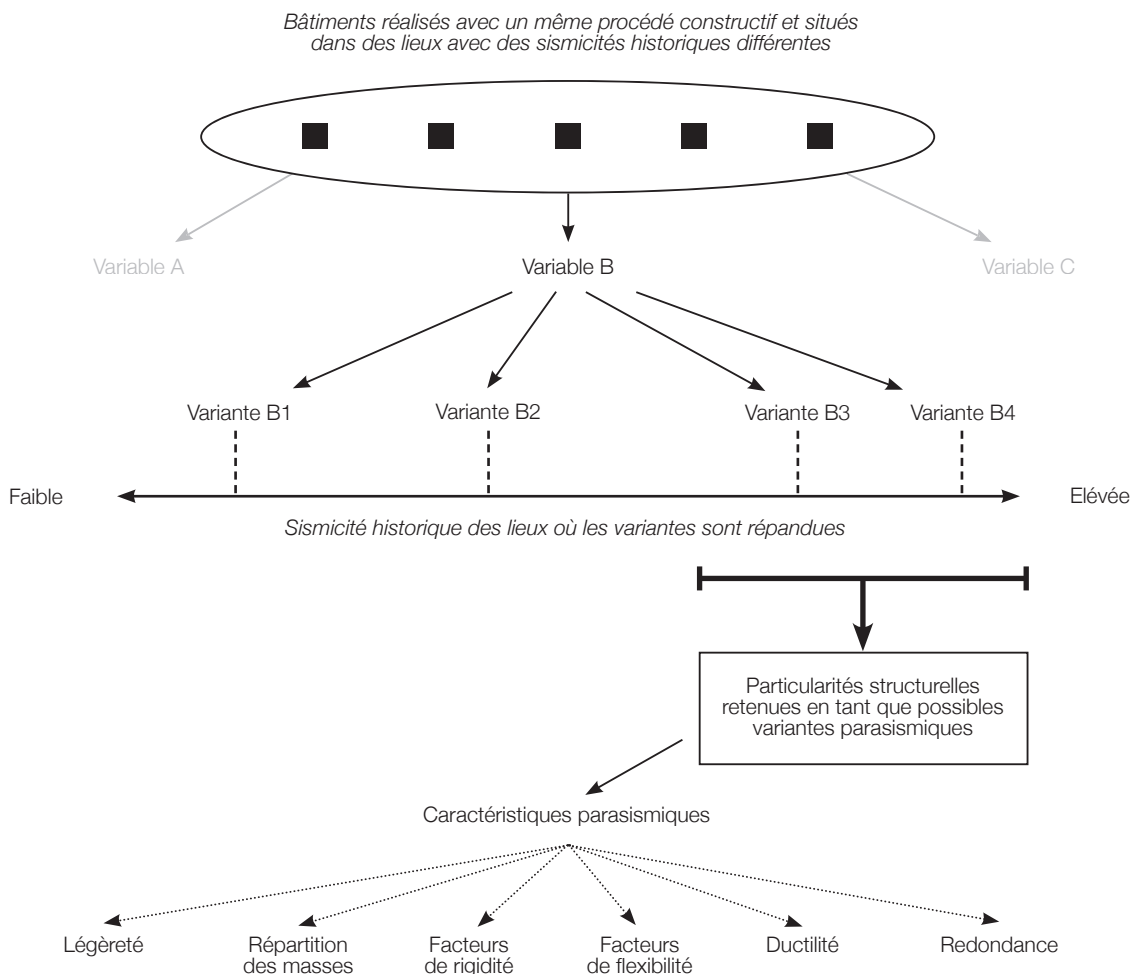
Tab.20 Schéma synthétisant la méthode d'analyse pour l'identification des variantes constructives susceptibles d'être adaptées au niveau local de risque sismique.

6.2. PARTICULARITÉS AUGMENTANT L'EFFICACITÉ DU PROCÉDÉ CONSTRUCTIF

Des différences considérables peuvent subsister entre les architectures réalisées avec un même procédé constructif. Le cas échéant, les variables qui sont en rapport direct avec le phénomène sismique sont perceptibles en comparant les ouvrages situés dans une zone géographique très étendue et dont la sismicité historique est hétérogène. Par exemple, parmi les bâtiments en moellons comprenant des insertions horizontales en forme d'échelle, la variable constructive prépondérante coïncide avec l'intervalle vertical de ces dernières ; dans les structures à ossature bois avec remplissage en briques, ce sont plutôt le nombre des diagonales de contreventement et la manière de les agencer qui changent.

Les variations qui augmentent ou réduisent l'efficacité d'un procédé constructif particulier envers les tremblements de terre peuvent être investiguées en considérant la sismicité historique des lieux où les différentes variantes sont présentes. Plus précisément, les particularités qui marquent les constructions situées dans des sites avec une sismicité modérée-élevée sont à retenir en tant que possibles variantes parasismiques, car susceptibles de constituer des facteurs améliorant la performance du procédé. Cette propension est moindre pour les particularités des lieux à faible sismicité, bien qu'elles puissent être toutefois adaptées au niveau local de risque.

L'intérêt d'identifier les variations dans la mise en œuvre d'un procédé constructif réside également dans l'importance de pouvoir rapporter les nombreuses particularités structurelles différenciant les ouvrages à des caractéristiques parasismiques distinctes (notamment celles de ductilité et de redondance) ; ce qui permet de mieux qualifier leur apport en cas de tremblement de terre.



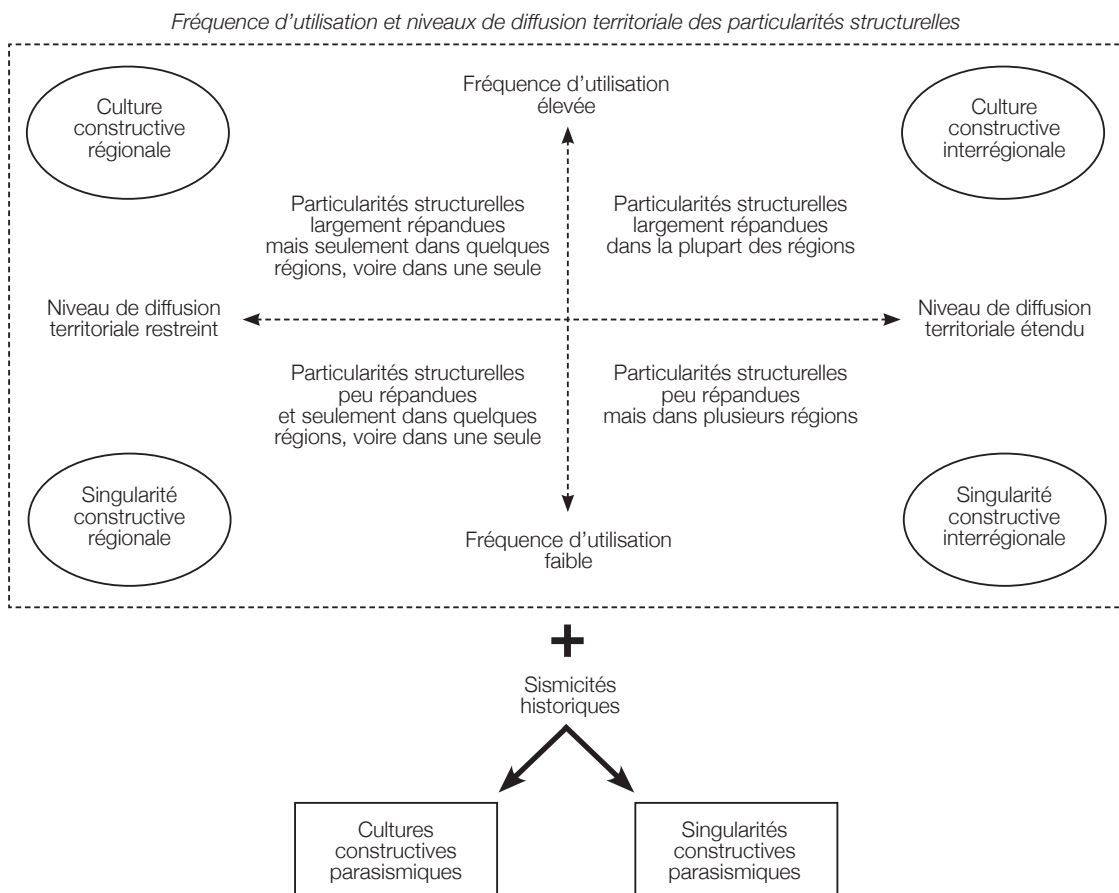
Tab.21 Schéma synthétisant la méthode d'analyse pour l'identification des particularités structurelles susceptibles d'augmenter l'efficacité d'un procédé constructif particulier envers les tremblements de terre.

6.3. CULTURES ET SINGULARITÉS CONSTRUCTIVES PARASISMIQUES

Parmi les traits qui marquent le bâti vernaculaire, certains peuvent être considérés comme distinctifs d'une « culture » constructive, car très répandus, tandis que d'autres coïncideraient plutôt avec des « singularités », en raison de leur faible fréquence d'utilisation. De plus, ils peuvent correspondre à des caractéristiques « régionales » ou « interrégionales », en fonction de leur niveau de diffusion territoriale.

Par exemple, la pratique d'intégrer des éléments horizontaux en bois au sein de murs porteurs en maçonnerie était largement répandue dans de nombreuses régions sur le territoire de la chaîne alpino-himalayenne ; elle peut, de fait, être considérée comme partie d'une culture constructive interrégionale. Toutefois, des différences subsistent entre les plusieurs types d'insertions, tant en ce qui concerne leur fréquence d'utilisation que leur diffusion territoriale. Ainsi, le long de la faille nord anatolienne, celles en forme d'échelle sont très répandues, mais uniquement dans certaines zones géographiques ; elles coïncident à des cultures constructives régionales. L'utilisation de feuillets en bois particulièrement minces est aussi délimitée à des endroits bien précis, mais leur présence dans le bâti est généralement beaucoup plus faible ; elles sont donc à considérer plutôt comme des singularités constructives régionales. En revanche, les dispositifs mis en œuvre avec une fréquence réduite mais qui sont présents dans plusieurs régions, comme les assemblages bois à queue d'aronde, représenteraient des singularités constructives interrégionales.

Prendre en compte la fréquence d'utilisation et le niveau de diffusion territoriale des particularités structurelles favorise une compréhension fine des pratiques vernaculaires. En faisant référence à la sismicité historique des lieux où elles ont été adoptées, une telle démarche permet d'identifier les cultures constructives et les singularités constructives susceptibles de posséder un caractère parasismique, en facilitant ainsi la reconnaissance et la valorisation des mesures de protection ordinairement mises en œuvre par les bâtisseurs vernaculaires comme de celles adoptées plus exceptionnellement.



Tab.22 Schéma synthétisant la méthode d'analyse pour l'identification des cultures constructives et des singularités constructives susceptibles de posséder un caractère parasismique.



Fig.112 Tremblement de terre ayant affecté la ville de Constantinople (actuelle Istanbul, Turquie) en 1566 : gravure sur bois réalisée par Hermann Gall en 1566 (Source : Kozák et Cermák 2010).

Partie III : Ressources cognitives parasismiques

INTRODUCTION DE LA PARTIE III

Au sein des cultures du risque qui se sont développées au cours des siècles, le développement de l'ensemble des savoirs et savoir-faire se rapportant au comportement dynamique du bâti s'effectuait principalement par l'observation des dégâts lors d'événements sismiques. Ce processus d'apprentissage a permis l'essor de procédés constructifs possédant un caractère parasismique, en particulier dans les régions régulièrement assujetties à ces phénomènes. De nos jours, la perte des savoirs qui y étaient associés, consécutive à la régression des pratiques vernaculaires, est susceptible de réduire la résilience des milieux contemporains. En effet, celle-ci est intrinsèquement liée aux ressources cognitives relatives aux différents types de structures composant le bâti existant et qui permettent l'identification de forces et faiblesses auxquelles se référer pour l'élaboration des réponses à apporter pour une protection sismique. Dans la réflexion sur la vulnérabilité des environnements bâtis vernaculaires, il devient ainsi nécessaire d'examiner non seulement leur capacité à faire face à des éventuelles secousses, mais également le niveau de savoir actuel à leur égard.

Cette troisième partie de la thèse s'intéresse aux connaissances techniques relatives au comportement sismique des bâtiments vernaculaires, ainsi qu'à l'ensemble des modalités qui permettent leur acquisition. Pour ce faire, elle se concentre sur les ressources cognitives corrélées aux architectures réalisées avec l'un des procédés constructifs qui ont été identifiés dans cette recherche comme possédant un caractère parasismique : l'intégration d'éléments horizontaux en bois dans des murs en maçonnerie. Cette analyse se focalise sur un type particulier d'insertions, en forme d'échelle, où deux tasseaux longitudinaux connectés par des traverses sont disposés dans les deux côtés du mur. Le choix de ce procédé réside dans le constat de deux aspects qui le rendent particulièrement représentatif de la corrélation qui peut exister entre les pratiques constructives vernaculaires et le *facteur séisme* : ce procédé était traditionnellement très répandu dans de nombreuses régions du monde exposées à un risque sismique élevé et, simultanément, il n'a pas été utilisé (ou pour le moins pas encore répertorié) dans les zones géographiques se caractérisant par une sismicité faible ou nulle.

Un double objectif est à la base de cette partie. D'une part, elle vise à appréhender les principaux facteurs d'ordre constructif qui déterminent l'efficacité sismique du procédé et qui favorisent une compréhension fine de la vulnérabilité des structures ainsi réalisées. D'autre part, le travail conduit a également concerné les modalités selon lesquelles les connaissances relatives à son caractère parasismique sont acquises et pourraient être davantage approfondies et renforcées.

Cette investigation s'est appuyée sur le savoir découlant de recherches scientifiques quant au comportement statique et dynamique de ce type de structure, comme sur l'examen des solutions adoptées par les bâtisseurs vernaculaires.

ENTRE INTUITIONS ET SAVOIRS

1. INCLUSION D'ÉLÉMENTS HORIZONTAUX DANS LES MURS

1.1. INFLUENCE DES INSERTIONS SUR LE COMPORTEMENT STATIQUE

Nombreux sont les exemples d'architectures qui se caractérisent par la présence d'éléments en matière végétale intégrés horizontalement dans des murs porteurs constitués de matière granulaire, spécialement dans des maçonneries en moellons ou en briques de terre crue¹⁶³. Celle-ci est de fait une pratique d'origine très ancienne qui s'est prolongée, au fil des millénaires, jusqu'à nos jours.

Déjà les écrits de l'historien grec Hérodote (V^e siècle av. J.-C.) témoignent que les constructeurs de Babylonie (II^e millénaire av. J.-C.) introduisaient des couches de nattes de roseaux dans les murs en maçonnerie en briques de terre crue (Latina 1989). Un exemple de cette pratique est la ziggourat cassite d'Aqar Quf (Irak), où ces nattes furent disposées avec un espacement vertical régulier, toutes les 5 assises de briques (fig.113a). Quelques siècles plus tard, à l'âge hellénique et pendant la période byzantine, des éléments en bois ont été intégrés dans la section des murs en sens longitudinal et transversal (tous les 45 cm), constituant des treillis horizontaux verticalement espacés d'environ 150 cm (fig.113b; Choisy 1883). Au XI^e siècle, dans les bâtiments mérovingiens et carolingiens d'Europe occidentale, une pratique courante consistait à noyer des longrines en bois dans le remplissage en cailloux situé entre les deux parements en pierre de taille, notamment en correspondance de l'appui des fenêtres et de la corniche du toit (fig.113c; Viollet-Le-Duc 1856). De manière analogue, au XV^e siècle, les bâtisseurs européens et du Moyen-Orient intégraient des longrines dans les maçonneries de pierre de taille lors de la réalisation de très hautes tours¹⁶⁴ (fig.113d; Martini 1480; Resta & Brunamonti 1998).

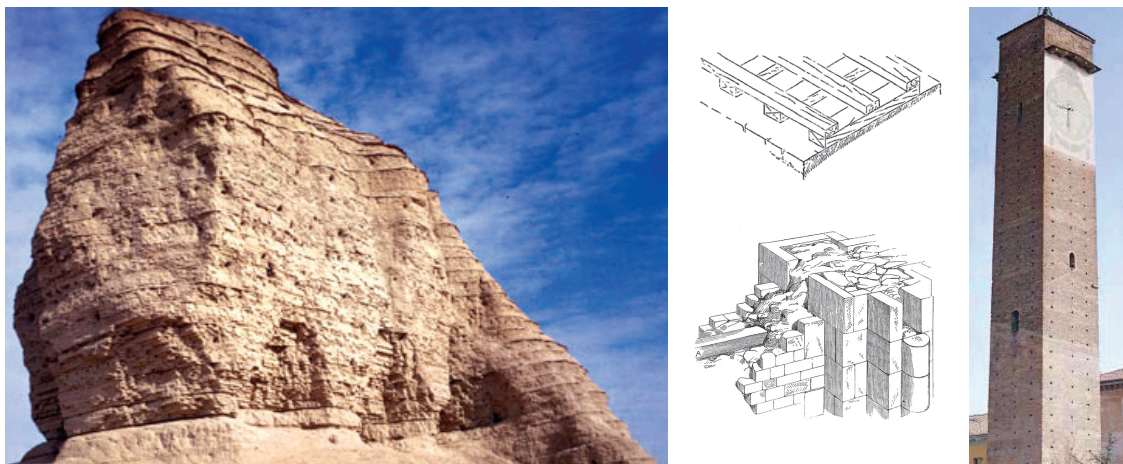


Fig.113 Insertions horizontales dans les murs : a) Ziggourat cassite d'Aqar Quf (Irak) en briques de terre crue avec des couches de nattes de roseaux (Crédit : Centro Ricerche Archeologiche e Scavi); b) Dessin du treillis en bois intégré dans les maçonneries en briques de terre crue (Source : Choisy 1883) ; c) Dessin d'un mur en pierre avec parements et longrine noyée dans la masse (Source : Viollet-Le-Duc 1856) ; d) Tour de l'Horloge de Pavie (Italie) datant du Moyen Age et réalisée en maçonnerie de pierre avec des longrines en bois (Crédit : Resta et Brunamonti).

163 Les maçonneries en moellons et en briques de terre crue correspondent à des ensembles de grains minéraux : dans le premier cas, un ensemble constitué de grains de dimensions variables entre 2 et 50 cm ; dans le deuxième cas, un ensemble de briques composées par des grains de taille beaucoup plus réduite, maximum 2 mm.

164 Ce dernier procédé est aujourd'hui témoigné par la présence de trous dans les murs en correspondance de l'endroit où, jadis, les éléments en bois étaient présents avant leur décomposition ; ces vides représentent aujourd'hui un problème non négligeable en cas d'événement sismique, car ils génèrent une discontinuité importante au sein de la maçonnerie (D'Antonio 2013).

1.1.1. INCIDENCE DE LA FORME, DE L'ÉPAISSEUR ET DE L'ESPACEMENT VERTICAL DES INSERTIONS

Dans les architectures vernaculaires qui caractérisent les environnements bâtis actuels, les insertions horizontales en bois se particularisent par des configurations et des dimensions différentes, notamment en forme de rondins, d'échelles, de planches rigides ou de feuillets souples (cf. partie II, chap.1.2. & étude de cas). L'intervalle vertical avec lequel elles sont disposées dans les murs est également très variable.

Ci-après, l'incidence que ces éléments peuvent avoir sur le comportement statique d'un système porteur est exposée sur la base d'essais de laboratoire qui ont été conduits à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne par trois étudiants en génie civil avec l'encadrement de l'auteur de cette thèse¹⁶⁵ (Lehmann et al. 2013). Ces tests ont été réalisés sur des blocs en terre crue compactée - matière granulaire par excellence¹⁶⁶ - dans lesquels ont été intégrées des insertions horizontales en bois. Ces blocs présentent des dimensions similaires (L=10 cm, l=10 cm, H=30 cm) et sont constitués du même type de terre (graveleuse - argileuse) ; ils se différencient exclusivement en ce qui concerne les insertions. Huit types d'échantillons ont été réalisés en fonction des trois paramètres suivants : la forme des insertions, occupant toute la section de l'échantillon (section pleine) ou uniquement le pourtour (section creuse) ; leur épaisseur (0,3 ou 1 cm) ; leur espacement dans le plan vertical (5 ou 15 cm). Les résultats de ces expérimentations sont commentés en référence à ces trois variables, afin de mieux saisir leur influence respective sur le comportement des blocs de terre.



Fig.114 a) Bâtiment avec des insertions horizontales en bois dans les piliers en maçonnerie composant le système porteur vertical du rez-de-chaussée, Ohrid, Macédoine ; b) Vue rapprochée.

La discussion de ces résultats ne vise pas à établir, forcément et systématiquement, des analogies directes entre le comportement des échantillons testés et celui des constructions vernaculaires. De fait, les bâtisseurs ont généralement utilisé les insertions horizontales en bois pour la réalisation de systèmes porteurs continus, tels que des murs en maçonnerie ; cela bien qu'il existe également des cas où elles ont été employées pour des éléments ponctuels, tels que des piliers (fig.114).

L'intérêt de présenter les résultats de ces expérimentations réside plutôt dans les constats d'ordre général qui peuvent être formulés et qui permettent d'apprécier, de manière indicative, les avantages d'une telle pratique constructive. Globalement, on remarque qu'en variant les propriétés des insertions horizontales (leur forme et épaisseur) ainsi que leur espacement vertical, on peut doubler la résistance à la compression des blocs en terre crue et octupler leur déformation à la rupture, soit leur ductilité.



Fig.115 Instrument de charge utilisé pour tester la résistance à la compression des blocs en terre crue.

¹⁶⁵ Ces essais de laboratoire ont été effectués par les étudiants Selma Lehmann, Francesco Moccia et Jochua Reinle, dans le cadre du cours de l'Unité d'enseignement ENAC *Apprendre du vernaculaire_la terre crue* en 2013, dont les responsables ont été le Prof. Pierre Frey et l'auteur de cette thèse.

¹⁶⁶ La granularité d'une terre représente la teneur centésimale en fractions de grains, définies selon la classification suivante: cailloux (200 mm - 20 mm), graviers (20 mm - 2 mm), sables grossiers (2 mm - 0,2 mm), sables fins (0,2 mm - 0,06 mm), silts (0,06 mm - 0,02 mm), silts fins (0,02 mm - 0,002 mm), argiles (< 0,002 mm) (Houben & Guillaud 1989).

FORME DES INSERTIONS

La résistance à la compression et la ductilité des échantillons sont plus importantes lorsque les insertions en bois ont une section pleine. Grâce au fait que celles-ci répartissent la pression verticale, les grains de la terre sont sollicités sur toute la section du bloc, ce qui assure une transmission uniforme des forces (fig.116). Dans l'échantillon avec une seule insertion pleine à mi-hauteur, la moitié inférieure présente, de fait, une rupture régulière en forme de cône due au phénomène de freinage (la déformation latérale a été gênée à cause du frottement sous l'appui) tandis que la moitié supérieure est restée intacte (fig.117b,c). En revanche, dans les échantillons avec des insertions creuses, c'est la rupture de ces dernières qui est à l'origine de l'écroulement du bloc (fig.117d). Dans ce cas, la résistance globale de l'échantillon dépend du niveau de résistance mécanique du bois : en s'opposant à la dilatation de la terre, les insertions agissent en tant qu'élément de confinement et garantissent la stabilité du bloc jusqu'à leur rupture en traction.

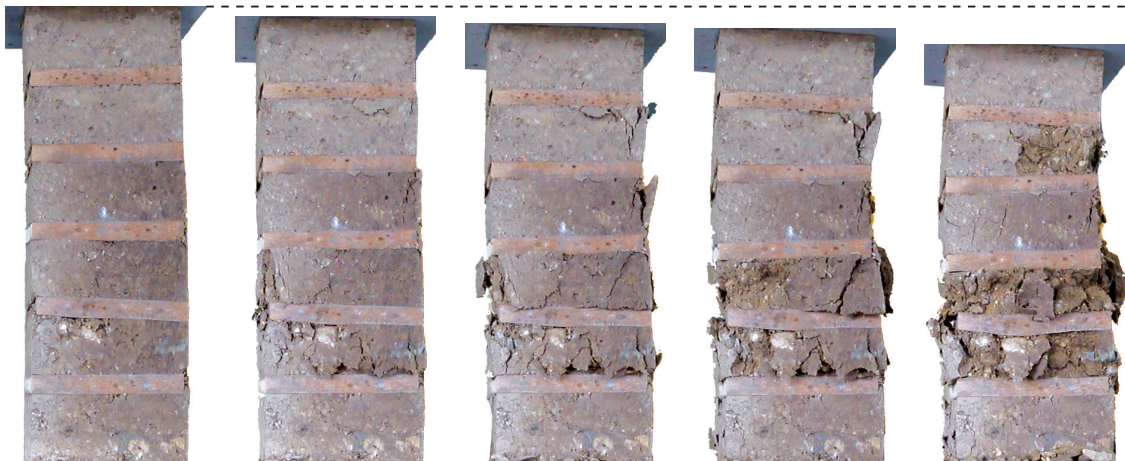


Fig.116 Evolution de la déformation de l'échantillon avec des insertions épaisses occupant toute la section du bloc (Crédits : Lehmann, Moccia et Reinle).



Fig.117 Comportement d'autres échantillons : a) Rupture fragile du bloc sans insertions horizontales ; Bloc avec une seule insertion, épaisse et pleine, avant sa mise en compression (b) et après (c) ; d) Rupture en traction des insertions creuses, due à la pression latérale exercée par la terre (Crédits : Lehmann, Moccia et Reinle).

Néanmoins, deux remarques particulières peuvent être formulées au regard de ces résultats indiquant une efficacité supérieure des insertions pleines. D'une part, une surface du bois moins rugueuse aurait comme conséquence une moindre adhésion entre les insertions et la terre, entraînant une répartition des charges verticales moins homogène au sein du bloc. D'autre part, des insertions creuses réalisées avec un matériau davantage résistant à la traction, par exemple en bois dur¹⁶⁷, amélioreraient de manière considérable le comportement des échantillons qui en sont pourvus.

¹⁶⁷ Dans cette expérimentation, les insertions horizontales sont en effet peu résistantes à la traction car elles ont été fabriquées à partir de panneaux composites de fibres de bois à moyenne densité.

ÉPAISSEUR DES INSERTIONS

En ce qui concerne l'épaisseur des insertions, on constate que plus elle est importante et meilleure est la performance du bloc de terre.

La résistance à la compression est supérieure dans les échantillons avec des insertions épaisses (1cm) d'environ 15 % par rapport à ceux possédant des insertions plus minces (0,3 cm). Le comportement rigide des insertions horizontales assure, de fait, une répartition homogène des charges verticales ; ce qui permet d'augmenter la résistance à la compression des blocs de terre de presque 60 % dans le cas d'un espacement réduit entre les insertions (5 cm) et de 25 % lorsque cet espacement est plus important (15 cm). Par contre, le comportement souple des insertions plus minces ne parvient pas à garantir une répartition des contraintes autant efficace : la rupture des échantillons a lieu par écrasement de portions du bloc, ce qui témoigne d'une distribution irrégulière des charges verticales. Leur résistance à la compression s'est toutefois révélée supérieure à celle des échantillons sans insertions, spécialement lorsque l'espacement entre les insertions est réduit.

Par rapport à la ductilité, on remarque qu'elle est toujours plus importante dans les blocs comprenant des insertions que dans ceux qui en sont dépourvus. Alors que ces derniers se caractérisent par un comportement faiblement ductile (comparable à celui d'un bloc de béton de ciment¹⁶⁸), la déformation à la rupture des échantillons avec des insertions est très élevée (fig.118), en particulier quand celles-ci sont épaisses ; dans ce cas, elle est deux fois plus importante que dans le cas d'insertions minces.



Fig.118 Déformation à la rupture très importante : a) Bloc avec insertions souples ; b) Bloc avec insertions rigides (Crédits : Lehmann, Moccia et Reinle).

ESPACEMENT ENTRE LES INSERTIONS

En ce qui concerne l'incidence de l'espacement entre les insertions sur le comportement des échantillons testés, deux commentaires peuvent être émis. Un espacement vertical réduit a une influence beaucoup plus importante sur la résistance à la compression des blocs de terre ainsi que sur leur ductilité. D'autre part, le constat qu'une dissemblance marquée subsiste dans le comportement des échantillons avec un espacement différent, laisse présager qu'il existe un intervalle « limite » au-delà duquel les éléments en bois ne parviennent plus à améliorer de manière notable et efficace la performance du système porteur vertical¹⁶⁹ ; et ceci indépendamment de leur forme et de leur épaisseur.

¹⁶⁸ La rupture des blocs de terre sans insertions horizontales se produit suivant un plan de glissement oblique, comme dans le cas d'un bloc de béton de ciment.

¹⁶⁹ L'identification de cet intervalle « limite » nécessiterait des expérimentations supplémentaires.

1.1.2. ACTION DU FROTTEMENT ENTRE ÉLÉMENTS HORIZONTAUX ET MASSE GRANULAIRE

Les insertions horizontales constituent des éléments constructifs qui peuvent être intégrés à une masse granulaire afin d'améliorer son comportement statique ; les essais de laboratoire présentés précédemment démontrent comme elles peuvent modifier de manière considérable la résistance à la compression et la ductilité des éléments porteurs. Dans certains cas particuliers, leur présence se révèle même indispensable pour garantir la stabilité des ouvrages.

Deux exemples représentatifs de la fonction essentielle que des éléments horizontaux peuvent assumer dans une masse granulaire coïncident avec les techniques dénommées de la « terre armée » et du « sable armé ».

Selon la technique de la terre armée¹⁷⁰, des armatures métalliques horizontales sont disposées dans une masse en terre crue compactée, avec un intervalle vertical régulier. Le principe à la base de cette technique réside dans l'interaction de frottement entre les grains de terre et les éléments de l'armature. Si le frottement est faible, il n'y a pas d'interaction importante, tandis qu'avec un taux de frottement élevé (comme dans le cas d'armatures nervurées), les efforts de traction sont transmis à l'armature, en soulageant ainsi la masse de terre, peu résistante à ce type de contraintes (Schlosser et al. 1969). Dans un tel cas de figure, « *tout se passe comme si la terre possédait, dans les directions où sont placées les armatures, une cohésion dont la valeur est directement proportionnelle à la résistance à la traction des armatures* » (Schlosser 1972, p.80).



Fig.119 Mur de soutènement routier en terre armée : la terre est compactée entre le talus et un parement constitué d'écailles en béton fixées aux armatures (Crédit : Recocanada dans Anger 2011).

Un cas encore plus représentatif de l'importance structurelle assumée par des éléments horizontaux correspond à des systèmes porteurs constitués exclusivement de grains de sable. Différemment d'une masse en terre crue où la cohésion entre les grains est favorisée par l'action collante de l'argile (Houben & Guillaud 1989), l'équilibre statique d'un tas de sable à l'état sec repose presque exclusivement sur l'action du frottement (Anger & Fontaine 2009). Dans ce cas, la transmission des charges gravitationnelles s'effectue par un passage de contraintes d'un grain à l'autre suivant un parcours déterminé par leur disposition et par la présence d'espaces vides imposant, de fait, des chemins obligés (fig.120; Anger 2011). La transmission des forces n'a donc pas lieu suivant une direction verticale : le poids de chaque grain est transféré sur les côtés en suivant une trajectoire en forme de voûte (« effet voûte »). En revanche, si les assises des grains étaient chaque fois séparées par des insertions horizontales, chaque grain subirait exclusivement des pressions verticales et ceux se trouvant aux extrémités du tas seraient moins exposés à des poussées diagonales pouvant engendrer leur chute (Ibid.; Cangj 2005). Les composantes non verticales des charges gravitationnelles sont, dans ce cas, reprises en traction par les insertions.

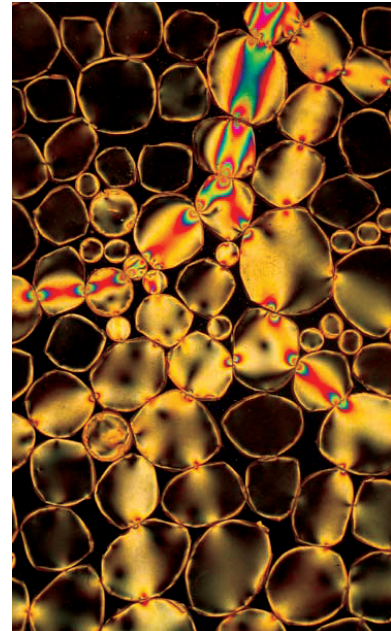


Fig.120 Chaînes de forces dans une matière granulaire soumise à une pression verticale (Crédit : Anger).

¹⁷⁰ Répandue dans le domaine du génie civil, la technique de la terre armée (brevetée au cours du XX^e siècle par l'ingénieur français Henry Vidal) est employée principalement pour la réalisation de murs de soutènement routiers ; ceux de l'autoroute A53 Roquebrune-Menton (France), réalisés en 1968-69 et d'une hauteur atteignant les 23 mètres, en sont un exemple. Il est intéressant de souligner que la terre armée a été utilisée également pour certains ouvrages militaires et pour les merlons de protection des dépôts de produits explosifs, en raison de sa bonne résistance envers des sollicitations horizontales (Schlosser & Guilloux 1982).

L'efficacité des insertions horizontales dans la stabilité d'un mur en matière granulaire est attestée par la longévité d'une partie de la muraille de Chine située dans le désert de Gobi et datant d'environ neuf siècles. Dans cet ouvrage, des strates de branchages sont alternées à des couches compactées de gravier et de sable (fig.121a,b; Anger 2011). L'action des insertions est également manifeste dans la soi-disant « tour de sable armé », structure autoporteuse conçue par le centre de ressources pédagogiques « Atelier Matières à Construire » (AMàCO) de Villefontaine (France). Cette tour expérimentale se compose par de minces parois de sable compacté, de 4 cm d'épaisseur, dans lesquelles une maille en géotextile a été introduite avec un intervalle vertical régulier, environ tous les 2 cm¹⁷¹ ; grâce à ce dispositif, elle peut atteindre les 3 mètres de hauteur (fig.121c,d; Ibid.).



Fig.121 Sable armé : Muraille de Chine dans le désert de Gobi (a, Crédit : Thompson) et représentation de la mise en place de strates de branchages (b, Crédit : Chao) ; c,d) Tour de sable armé réalisée à l'EPFL dans le cadre du cours de l'Unité d'Enseignement ENAC *Apprendre du vernaculaire la terre crue*, en collaboration avec l'équipe d'AMàCO.

L'importance de l'action du frottement sur la stabilité d'un ouvrage ne se limite pas aux structures constituées d'une masse granulaire et d'insertions horizontales. Elle concerne également celles où la matière en grain est mise en œuvre en tant que remplissage d'un système composé de tasseaux de bois, empilés perpendiculairement les uns sur les autres sans liaisons mécaniques, selon un principe de confinement, comme pour les murs indiqués avec le terme anglais *crib walls* (Bullen et al. 1992). Leur stabilité repose exclusivement sur le frottement entre les composantes structurales. En effet, la façon selon laquelle se déroule la transmission des charges gravitationnelles au sein d'une masse granulaire, suivant des chemins en forme de voûte, fait que le poids du remplissage exerce des pressions diagonales et verticales sur les tasseaux, ce qui assure une adhésion suffisante entre les différents éléments de la structure en bois (Anger 2011).

Dans cette logique constructive, un type particulier de mur porteur a été élaboré pour un bâtiment d'hébergement d'urgence réalisé à Grenoble (France) en 2006¹⁷² : dans ce cas, des tasseaux superposés constituent une double cloison remplie avec de la terre graveleuse (fig.122a,b; Ibid.).

Par ailleurs, les avantages résultant de l'action du frottement entre des éléments en bois et la matière en grains ont été ingénieusement exploités également dans les mines de charbon du XIX^e siècle pour la réalisation de piliers étayant les parties instables des tunnels ; plus la pression verticale est importante et plus élevée est la stabilité de ces piliers (fig.122c; Hughes 2000).

171 La somme totale des contraintes que les mailles absorbent est inversement proportionnelle à leur espacement vertical, ce qui indique que ce dernier ne doit pas être trop grand, faute de quoi l'équilibre statique de la tour n'est plus assuré.

172 Prototype d'hébergement de 16 mètres carrés (pour 2 personnes) conçu par le collectif d'architectes CJMX dans le cadre d'une initiative menée par le Collectif des Associations de Bénévoles de l'Agglomération grenobloise, avec le concours du Centre Communal d'Action Sociale et du laboratoire CRAterre-ENSAG.



Fig.122 Terre confinée : Chantier du prototype de l'hébergement d'urgence réalisé à Grenoble (a) et détail du système porteur vertical (b, Crédits : Porte dans Anger 2011) ; c) Pilier de soutènement dans une mine de charbon, Yorkshire, Angleterre (Source : www.miningartifacts.org).

Ces trois techniques (terre armée, sable armé et terre confinée) n'ont aucun rapport direct avec les problèmes d'ordre structural qui résultent de l'impact d'un tremblement de terre. Toutefois, elles mettent très bien en évidence la propension des insertions horizontales à absorber les composantes non verticales des forces qui se génèrent au sein d'une masse granulaire et, donc, leur efficacité à diminuer les contraintes auxquelles celle-ci est soumise.

1.1.3. AVANTAGES PRAGMATIQUES DES INSERTIONS

En ce qui concerne les murs en maçonneries en moellons ou en briques de terre crue, l'intégration d'éléments horizontaux en bois non seulement améliore leur comportement structural mais, de plus, elle permet de réduire le risque d'écroulement pouvant dériver d'un tassement différentiel du terrain ou de la dislocation des unités maçonnées due à une remontée de l'eau du sol¹⁷³ (Langenbach 2009).

Parallèlement, l'emploi d'insertions horizontales peut aussi être la résultante des avantages qu'elles offrent pendant le chantier :

- en formant des arases qui garantissent l'horizontalité des assises de la maçonnerie, elles permettent d'équilibrer les éventuelles imperfections d'exécution du mur (Sumanov 2003);
- leur présence limite les problèmes pouvant découler de l'affaissement des parties inférieures du mur, qui généralement a lieu en raison du lent durcissement du mortier de terre ou à la chaux¹⁷⁴ (Kizis 1977; Sumanov 2003; Vissilia & Villi 2010). Cet avantage est considérable d'un point de vue pragmatique car il permet de réduire le temps nécessaire pour l'exécution d'une maçonnerie, étant donné qu'un séchage complet du mortier n'est pas indispensable pour pouvoir avancer dans les travaux ;
- elles permettent d'éviter une déformation excessive de la maçonnerie pendant la période de tassement du sol qui suit l'achèvement de l'ouvrage (Latina 1989; Sumanov 2003). L'attribution de ce rôle particulier aux éléments en bois intégrés dans les murs est témoigné par le fait que, dans certains cas, les bâtisseurs vernaculaires coupaient ceux qui, par la suite, s'avéraient contraignants à l'usage du bâtiment, car par exemple situés au milieu d'une ouverture¹⁷⁵ (Choisy 1883).

¹⁷³ Par capillarité, l'eau du sol remonte dans le mur et détériore les mortiers (de terre crue ou à la chaux), en créant ainsi des vides qui peuvent déstabiliser les éléments de la maçonnerie.

¹⁷⁴ Le mortier de terre se durcit suite au processus d'évaporation d'une partie de l'eau qu'il contient, tandis que le mortier à la chaux se durcit suite au processus chimique généré par son contact avec l'air.

¹⁷⁵ Ce fut le cas pour la tour byzantine de la place St. Marc à Venise (Italie), réalisée au IX^e siècle.

1.2. INSERTIONS ET SOLLICITATIONS : DEUX CORRÉLATIONS SPÉCIFIQUES

En raison des avantages pragmatiques offerts par les insertions horizontales en bois ainsi que de leur efficacité à améliorer le comportement statique d'un mur, il devient difficile de savoir avec exactitude dans quelle mesure leur récurrence dans le bâti dérive de l'intention des bâtisseurs à réduire la vulnérabilité des ouvrages envers des événements exceptionnels, tels que les séismes. Néanmoins, on peut souligner l'existence de deux corrélations particulières mettant en évidence le fort lien entre l'adoption d'une telle pratique et le besoin d'accroître la résistance du bâti envers des éventuelles sollicitations horizontales.

1.2.1. OUVRAGES MILITAIRES

L'incorporation d'éléments horizontaux en bois dans une masse porteuse coïncide avec un procédé constructif qui était répandu surtout pour la réalisation de bâtiments militaires (châteaux et tours), où il était nécessaire d'assurer une bonne liaison entre les différentes parties structurales afin d'augmenter leur stabilité, en cas d'attaques ennemies. Ce procédé caractérise même des ouvrages d'importance stratégique, comme les murailles défensives et les remparts de certaines villes (Milizia 1781; Hughes 2000). Dans la région de l'ancienne Dacie (I^{er} siècle av. J.-C.), sur le territoire actuel de la Roumanie et de la Moldavie, des murailles en terre compactée de 3-4 mètres d'épaisseur et de 10 mètres de hauteur (*murus Dacicus*) étaient réalisées en y englobant des traverses de bois liant les deux parements en maçonnerie de pierre de taille (fig.123a,b). Une pratique constructive semblable a été adoptée par les celtes protohistoriques (VIII^{er} siècle av. J.-C.) résidant en Gaule (territoire correspondant à l'actuelle France) pour la réalisation de remparts de villes (*murus Gallicus*). Dans ce cas, de très longs éléments longitudinaux et transversaux étaient intégrés régulièrement aux murs, formant des treillis horizontaux très denses, verticalement espacés d'approximativement 60 cm (fig.123c,d). À l'égard de ces ouvrages, Jules César (100-44 av. J.-C.) a écrit qu'il était « impossible de renverser ou d'entamer cette masse compacte »¹⁷⁶ et, plusieurs siècles après, Rondelet (1743-1829) précisa que les poutres intégrées étaient, en effet, très efficacement reliées entre elles par des assemblages à mi-bois (fig.123e; Rondelet 1834). L'utilisation de treillis de bois présentait effectivement un double avantage : d'une part, les éléments transversaux garantissaient le bon ancrage des parements (Vitruve I^{er} siècle av. J.-C. dans Ibid.); d'autre part, les éléments longitudinaux permettaient de « localiser l'effet des projectiles de l'ennemi sur le mur et [...] faciliter les réparations » (Philon de Byzance III^{er} siècle av. J.-C. dans Choisy 1883, p.116).



Fig.123 *Murus Dacicus* : Maçonnerie de pierre avec trous pour les traverses à Blidaru en Roumanie (a, Crédit : Oroles) et modèle reconstruit montrant la liaison particulière entre les parements et la traverse, assurant leur bon ancrage (b, Crédit : Codrin) ; *Murus Gallicus* : Façade (c) et section (d) d'un mur reconstruit dans l'ancienne ville de Bibracte, France (Crédits : Gavet) ; e) Dessin des assemblages mi-bois d'après Rondelet (Source : <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/home>).

¹⁷⁶ Dans l'ouvrage intitulé *Commentaires de César sur la guerre des Gaules*, éd. Charpentier de 1857 (Paris), page 330.

Les similitudes constructives entre les structures à caractère militaire et certaines architectures des zones sismiques sont à mettre en rapport avec la forte analogie entre les poussées exercées sur le bâti par les obus d'artillerie (les bombes ou les mines) et les forces qui se génèrent à son intérieur lors d'un tremblement de terre (Stellingwerff 1932).

La faible vulnérabilité sismique des grands immeubles d'habitation chinois réalisés en terre crue compactée et dénommés *Tulou* (fig.124) semblerait être, effectivement, la résultante de dispositions et dispositifs constructifs mis en œuvre pour augmenter leur résistance contre les attaques ennemies¹⁷⁷ (Huang 2010). Parmi ceux-ci, on peut mentionner le plan circulaire, la grande épaisseur des murs¹⁷⁸ (et sa réduction vers le haut), la présence d'une structure porteuse de bois ancrée aux murs de terre ainsi que, dans ces derniers, l'insertion selon le sens horizontal de branches de sapin, de bouts de bois ou de tiges de bambou (Ibid.; Liang & Hota 2009; Liang et al. 2011).

Parallèlement, la grande capacité des ouvrages militaires à faire face aux attaques ennemies peut avoir été à l'origine de l'emploi de ces mêmes procédés constructifs pour la réalisation d'autres types de bâtiments, civils et religieux, avec une résistance accrue aux séismes. Cela a été probablement le cas au Pakistan avec la pratique dénommée *Cator and cribbage* (fig. 125), basée sur l'intégration dans les murs en maçonnerie de longues éléments horizontaux en bois et de paires de petits tasseaux, superposés orthogonalement les uns sur les autres, qui, de fait, permettent d'augmenter considérablement le caractère flexible de l'ensemble bâti (cf. partie II, chap.1.2.; Hughes 2000; Jodidio 2011).

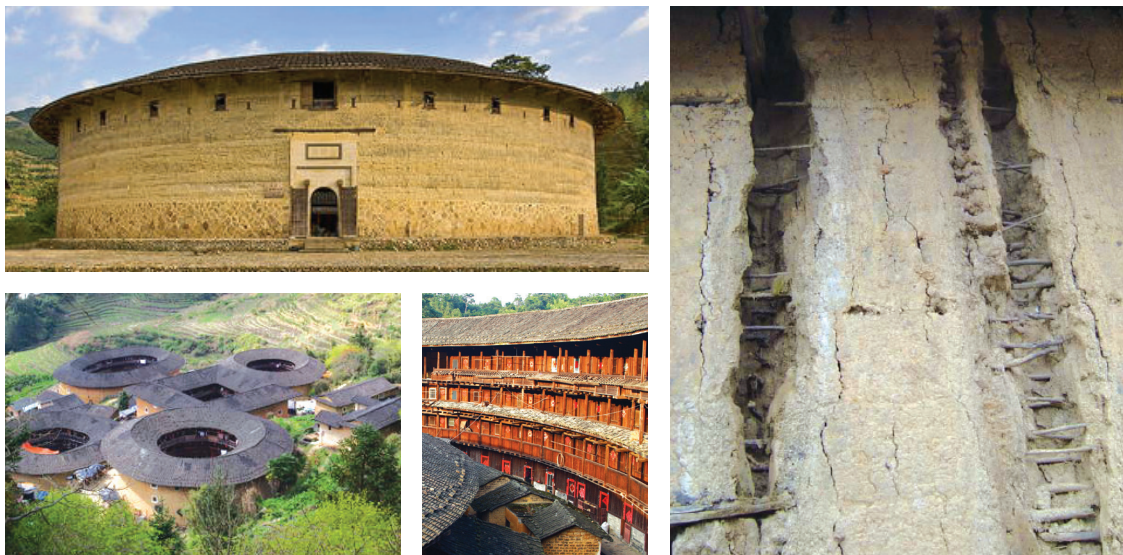


Fig.124 Habitations *Tulou* dans la province de Fujian, Chine : a) Mur extérieur en terre crue compactée (Crédit : Vincent) ; b) Insertions horizontales en bois et en bambou dans le mur de terre (Crédit : Ostrowski) ; c) Vue d'un ensemble de bâtiments de forme ronde et carrée (Crédit : Cloquet) ; d) Structure intérieure en bois ancrée au mur extérieur (Crédit : Xiang Lin).

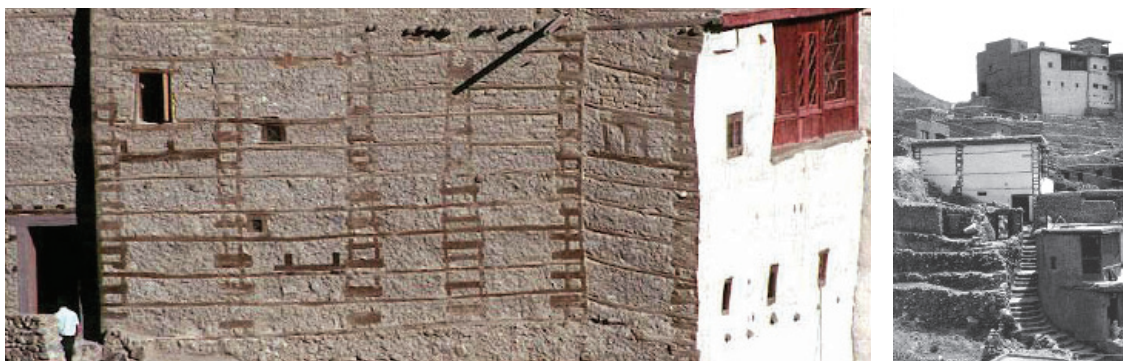


Fig.125 Pratique aujourd'hui dénommée *Cator and cribbage*, Pakistan : a) Façade du fort Baltit (Crédit : Allison) ; b) Village de Karimabad situé à proximité du fort avec des bâtiments réalisés suivant le même procédé constructif (Crédit : Flowerday).

¹⁷⁷ Ces constructions de 3 à 4 étages caractérisent le bâti vernaculaire des régions de l'Ouest et du Sud de la province du Fujian (Chine). Leur résistance est évoquée par un récit précisant qu'un bâtiment de ce type a subi seulement une petite fissure lors d'un tremblement de terre (M 7.2) ayant eu lieu en 1918 (à 60 km de distance) et que, lors d'une attaque militaire, l'impact de 30 obus s'est limité à 4 creux légers dans les murs de terre (Huang 2010).

¹⁷⁸ Les murs en terre compactée du rez-de-chaussée mesurent 130 cm d'épaisseur.

1.2.2. SISMICITÉ DES LIEUX

Le deuxième aspect à souligner est la corrélation entre la diffusion géographique du principe d'intégrer des éléments horizontaux en bois dans les murs et la sismicité historique des lieux.

À titre d'exemple, des remarques sont ci-après formulées à propos de similitudes constructives entre des sites sismiques le long de la chaîne alpino-himalayenne, en se référant en particulier à des exemples d'architectures situées dans les Alpes suisses. L'intention est d'évoquer le niveau de corrélation entre cette pratique et la sismicité historique dans ses grandes lignes ; néanmoins, les constats qui en découlent dégagent très clairement l'intérêt qu'il y a de pousser davantage l'étude du bâti vernaculaire suivant une telle démarche.

Dans le canton du Valais, une région au cœur des Alpes parmi les plus sismiques de la Suisse, des longrines en bois ont souvent été employées dans les maçonneries en moellons. Utilisées principalement en tant qu'élément d'appui pour le système porteur horizontal (solives et charpente), elles assument parfois également la fonction de tirants apparents ou noyés dans la masse améliorant la liaison entre les murs orthogonaux (fig.126). Par rapport à la deuxième variante, on relève une ressemblance avec certains bâtiments d'autres zones à fort risque sismique, par exemple dans la province de L'Aquila en Italie¹⁷⁹ (fig.127). Différemment, dans la plupart des constructions en moellons de la région de la Vallemaggia dans le canton du Tessin, une zone montagneuse proche du Valais mais à moindre sismicité historique, ces éléments constructifs se font beaucoup plus rares.

En revanche, dans le village de Wildhaus (canton de Saint-Gall), un autre site des Alpes suisses historiquement concerné par des tremblements de terre¹⁸⁰, il y a un ouvrage particulier qui se distingue par la présence d'éléments en bois intégrés dans le soubassement en pierre¹⁸¹ (fig. 128). L'analogie avec le procédé consistant à alterner des insertions horizontales à des segments en maçonnerie, très répandu dans de nombreuses régions sismiques le long de la chaîne alpino-himalayenne, est frappante (cf. partie II, chap.1.2.). De plus, l'adoption de cette pratique dans des régions sismiques dépourvues de bois, comme dans certaines zones désertiques de l'Iran, est également parlante : la résolution d'un problème exceptionnel pourrait, en effet, avoir justifié des efforts financiers et/ou physiques supplémentaires (Choisy 1899; Hughes 2000).



Fig.126 Emploi d'éléments horizontaux en bois au sein de maçonneries de pierre dans le canton du Valais, Suisse : a) Au niveau du plancher, Hérémenche (Crédit : Hunziker) ; b) Au niveau du linteau, Mayoux (Crédit : Patrimoine Suisse Section Valais) ; c) Reliant murs et piliers, Sampelet (Crédit : EPFL).

179 Dans la province de L'Aquila, des rondins en bois appelés *radiciamenti* ont été souvent employés pour relier les murs entre eux (cf. partie I, étude de cas & partie II, chap. 1.2.).

180 Dans le village de Wildhaus, deux séismes d'une puissance qui a été estimée à M 5.3 ont eu lieu en 1795 et en 1796 (Gisler et al. 2003).

181 Communication personnelle avec M. Hansjörg Hilti.



Fig.127 a,b,c) Photogrammes d'une vidéo documentant la démolition d'un bâtiment en maçonnerie de pierre à Vex (canton du Valais, Suisse) en 1981 (Crédits : Rudaz-Médiathèque Valais) : si l'existence de tirants reliant les murs entre eux au niveau du linteau pouvait être déduite par les ancrés métalliques visibles en façade, le fait qu'ils correspondent à des rondins en bois était difficilement décelable avant la destruction de l'édifice ; d) Rondin disposé au niveau du linteau dans un bâtiment de la ville de L'Aquila (Italie) ayant subi des dégâts relativement faible lors du séisme de 2009.

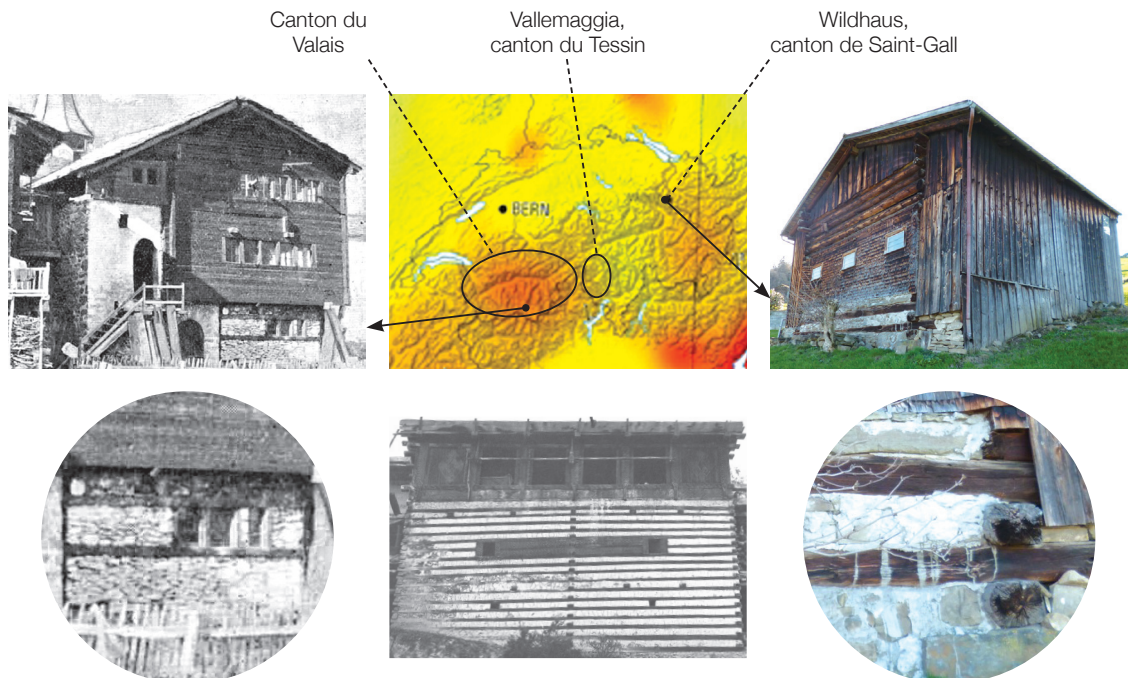


Fig.128 Images de gauche : Habitation avec des insertions dans la maçonnerie du rez-de-chaussée à Zermatt, canton du Valais, Suisse (Crédits : Hunziker) ; Images de droite : Bâtiment avec le soubassement constitué d'éléments en bois superposant et s'alternant à des parties en maçonnerie de pierre, Wildhaus, Canton de Saint-Gall, Suisse (Crédits : Hilti) ; Images du milieu : En haut, carte du risque sismique en Suisse (Crédit : Giardini, Jiménez & Grunthal) ; En bas, maison afghane en maçonnerie de pierre comprenant des insertions horizontales très rapprochées, Kamdesh (Crédit : Hallet et Samizay).

DE L'INTUITION CONSTRUCTIVE AU SAVOIR SCIENTIFIQUE

L'interdépendance entre l'emploi d'éléments horizontaux en bois et le besoin d'accroître la résistance des murs atteste en quelle mesure les bâtisseurs du passé sont parvenus, en périodes historiques différentes et dans des lieux variés, à résoudre de manière similaire les problèmes induits par des sollicitations horizontales. D'autre part, la convergence des stratégies adoptées témoigne de l'importance du rôle joué par l'intuition constructive dans l'élaboration de solutions à des problèmes structuraux complexes.

L'ingéniosité qui se niche dans les ouvrages vernaculaires est discernable en examinant, de plus près, les rôles assumés par les insertions horizontales en bois dans un mur soumis à des sollicitations sismiques. Dans le chapitre suivant, cette investigation est effectuée en se focalisant sur le procédé constructif consistant à intégrer dans les murs en maçonnerie des insertions en forme d'échelle.

2. INSERTIONS HORIZONTALES EN BOIS EN FORME D'ÉCHELLE

2.1. RÔLES DANS LE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MAÇONNERIES

Parmi les différents types d'insertions horizontales en bois adoptés par les bâtisseurs vernaculaires pour renforcer les murs en maçonnerie, celui en forme d'échelle, composé par des tasseaux longitudinaux connectés par des traverses, est le plus répandu (cf. partie II, chap.1.2.). Ce procédé constructif caractérise le bâti ancien de régions exposées à un risque sismique considéré comme élevé, en particulier dans la partie centrale-orientale de la chaîne alpino-himalayenne allant des Balkans aux montagnes de l'Himalaya, alors qu'il n'est pas présent dans celles avec une sismicité historique faible ou nulle (fig.129). Il a été également adopté dans d'autres régions du monde assujetties aux tremblements de terre, notamment en Amérique latine, au Chili et en Bolivie¹⁸². En dépit de la mise en œuvre de ce type de structures au niveau mondial, il n'existe pas un terme particulier en anglais pour les indiquer ; les architectures ainsi réalisées sont encore aujourd'hui très souvent mentionnées avec les appellations en langue locale, entre autres, *Hatil* en turque et *Bhatar* en langue pachtou (Nord du Pakistan).

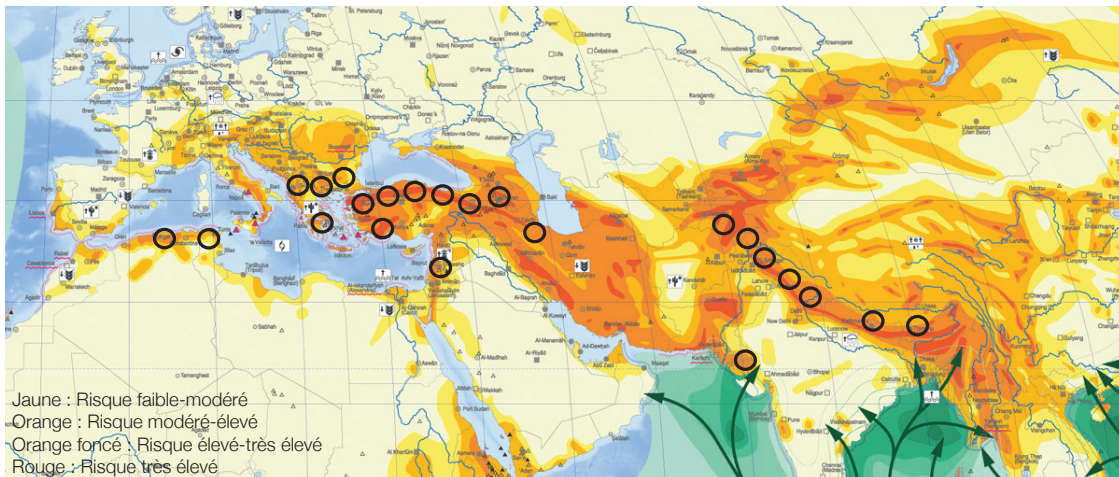


Fig.129 Carte du niveau d'exposition au risque sismique dans le territoire long de la chaîne alpino-himalayenne (Crédit : Munich Re Group) avec indication des zones où le procédé constructif considéré a été documenté.

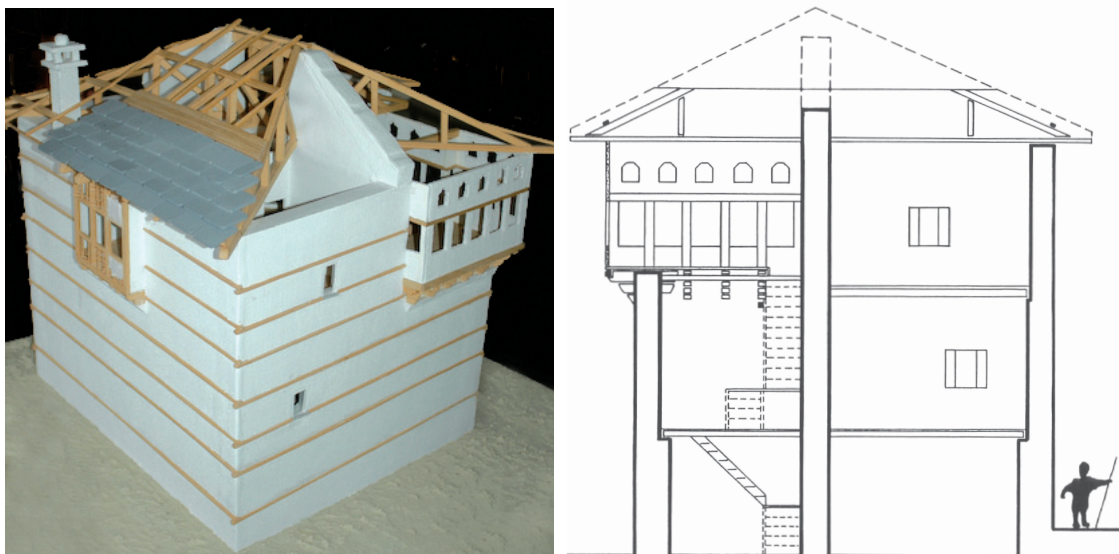


Fig.130 Maquette (a) et dessin en section (b) d'un bâtiment de la région de Pélion en Grèce, réalisés par Alexandre Chevalier, Nicole Grumser et Patrick Vogel (Crédits : EPFL).

¹⁸² Source : communications personnelles avec des architectes et des chercheurs travaillant dans ces régions.

Les résultats d'essais expérimentaux destructifs en laboratoire¹⁸³ et de modélisations numériques¹⁸⁴ effectués par des chercheurs universitaires (architectes et ingénieurs) permettent de dresser certains constats d'ensemble quant à l'apport de ce type d'insertions en cas d'événement sismique.

Avec les essais expérimentaux, il a été observé que la présence d'insertions horizontales influence de manière décisive le niveau d'endommagement subi par les murs en maçonnerie¹⁸⁵ (Coburn & Spence 1987a) et qu'elles permettent, notamment, d'augmenter la déformation à la rupture, soit leur ductilité (Vintzileou 2008; Lüchinger & Sturny 2014).

Sur la base des modélisations numériques, deux remarques indicatives peuvent être formulées. L'inclusion d'éléments horizontaux modifie le comportement d'une maçonnerie en variant sa fréquence de vibration (Oumou 2011) : une aptitude permettant d'éviter le risque que les oscillations du mur entrent en résonance avec les secousses sismiques. D'autre part, les constructions sans ce type d'insertions ne résisteraient pas à des tremblements de terre d'une puissance équivalente à celle des séismes qui sont le plus récurrents dans la région de l'Himalaya, où, de fait, ces éléments en bois sont très répandus (Parajuli 2009).

Afin de saisir davantage le caractère parasismique de ce type de structure, les différents rôles que les insertions horizontales en forme d'échelle semblent assumer sont synthétisés ci-après, en traitant d'abord leur influence sur la performance sismique de murs sollicités hors de leur plan, soumis donc à des forces perpendiculaires, et ensuite sur celle de murs sollicités dans le plan, c'est-à-dire soumis à des forces qui leur sont parallèles.

Les éléments présentés dérivent d'une analyse documentaire se rapportant à des essais expérimentaux, des modélisations numériques et des observations des dégâts sismiques sur le bâti¹⁸⁶. Certains des essais expérimentaux considérés se réfèrent à un projet de semestre développé par deux étudiants en génie civil de la Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (Suisse), avec l'encadrement du Professeur Mylène Devaux Baudraz de l'Institut des technologies de l'environnement construit¹⁸⁷ (Lüchinger & Sturny 2014).



Fig.131 Mur en pierres sèches comprenant une insertion horizontale en forme d'échelle dont le comportement sismique a été analysé à la Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg, au travers d'essais statique-cycliques (Crédits : Sturny et Lüchinger) : vues transversale (a), latérale (b) et depuis le haut (c).

183 Les essais expérimentaux de laboratoire incluent les tests dynamiques, dont le principe est de reproduire à l'aide de tables vibrantes les effets d'un tremblement de terre sur un modèle à échelle réelle ou réduite, ainsi que les essais statique-cycliques simulant au ralenti, avec des instruments de charge, l'action sismique sur une portion de mur (Lestuzzi & Badoux 2008).

184 Le but des modélisations numériques est de simuler le comportement dynamique des bâtiments par le biais de modèles théoriques.

185 Plus précisément, il a été constaté que les modèles sans insertions présentent un niveau d'endommagement considéré comme important alors que ceux qui en sont pourvus, si soumis au même type de sollicitations, subissent uniquement des dégâts légers (Coburn & Spence 1987a).

186 A ce propos, il est important de préciser que la littérature spécifique au procédé constructif examiné est globalement très limitée.

187 Ces essais ont été conduits par les étudiants Davide Lüchinger et Christian Sturny (Bachelor 2^{ème} année) suite à des échanges entre le Prof. Devaux Baudraz et l'auteur de cette thèse.

2.1.1. RÔLE DES INSERTIONS DANS LE COMPORTEMENT DE MURS SOLLICITÉS HORS DE LEUR PLAN

Sous des sollicitations hors de leur plan, le renversement est le mode de rupture le plus probable de murs en maçonnerie. Ce risque est considérablement réduit en présence d'insertions horizontales en bois en forme d'échelle, en raison, très vraisemblablement, des aspects suivants.

CONNEXION ENTRE COUCHES DU MUR

La présence de traverses de bois reliant les tasseaux longitudinaux compense l'éventuelle formation de fissures entre les différentes couches verticales du mur, en empêchant ainsi leur délamination (Vintzileou 2008) ; ceci même dans le cas de maçonneries en pierres sèches composées de deux parements avec un blocage au milieu (Lüchinger & Sturny 2014). Ces traverses constituent des dispositifs qui garantissent un bon verrouillage transversal des murs, elles ont donc un rôle particulièrement important notamment dans les maçonneries du type double mur avec blocage en pierre tout venant. En effet, ce genre de remplissage exerce des sollicitations transversales en raison de son poids propre, sans pour autant contribuer à la stabilité globale du mur.

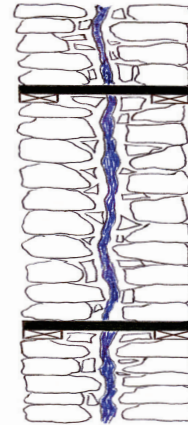


Fig.132 Schéma : risque limité de délamination totale des deux couches composant la maçonnerie, grâce à l'action des traverses.

SUBDIVISION DU MUR EN SEGMENTS HORIZONTAUX STABLES

La présence de tasseaux longitudinaux en bois à différents niveaux du mur permet de subdiviser sa hauteur effective en plusieurs segments se caractérisant par un faible élancement, avec donc un rapport hauteur-épaisseur réduit (Coburn & Spence 1987b; Crocker 2000). Dans ce cas de figure, les arcs de résistance qui se génèrent transversalement au sein d'un segment horizontal, entre deux insertions, bloquent efficacement les unités de la maçonnerie, ce qui empêche une déformation hors plan excessive (Parajuli 2009). Cette réaction spécifique se produit uniquement s'il y a une bonne adhérence entre les tasseaux longitudinaux et la maçonnerie, ce qui est généralement garanti par la pression exercée par le poids propre des parties du mur se trouvant au-dessus et des systèmes porteurs horizontaux (Coburn & Spence 1987b).

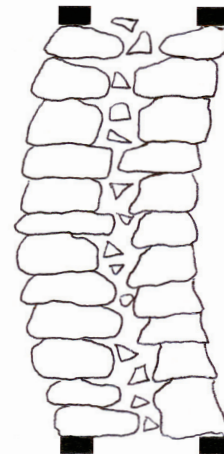


Fig.133 Schéma : déformation hors plan d'un segment de maçonnerie, permise grâce à la présence des tasseaux longitudinaux.

LIAISON ENTRE MURS ORTHOGONAUX

L'importance des insertions peut être mise en relation avec les différents modes de renversement de la maçonnerie, déterminés en fonction du type de liaison entre les murs orthogonaux (Lang 2002). Dans un bâtiment ordinaire en maçonnerie, le renversement total du mur se produit en absence de chaînages horizontaux (p.e. sans poutres en béton armé ou tirants métalliques) et à défaut de liaisons efficaces entre les maçonneries de murs orthogonaux (p.e. absence de chaînes d'angle en pierre de

taille). Au contraire, s'il y a une bonne connexion entre les parties maçonnées, il peut certes se produire un renversement mais ceci reste généralement circonscrit dans la moitié supérieure du mur ; risque qui est davantage réduit en présence d'un chaînage horizontal au sommet du mur. La continuité des insertions horizontales en bois entre les murs perpendiculaires constitue, donc, un facteur essentiel dans la réduction du risque de séparation des murs et de leur renversement total ou partiel (Langenbach 2009). En particulier, elle réduit considérablement le risque de renversement des murs qui ne sont pas ancrés aux solives du plancher (Vissilia & Villi 2010).

TRANSMISSION DES CHARGES AUX MURS PARALLÈLES AUX SOLLICITATIONS

La continuité des insertions entre les murs orthogonaux contribue également à diminuer les contraintes auxquelles une maçonnerie sollicitée hors de son plan doit faire face ; ceci en transmettant une partie des charges aux murs de refend, parallèles aux sollicitations sismiques¹⁸⁸ (Coburn & Spence 1987a; Rautela & Joshi 2008). Les insertions assument, dans une certaine mesure, la fonction qui est ordinairement assurée par les diaphragmes, soit les systèmes porteurs horizontaux d'une rigidité suffisante pour pouvoir transmettre les charges aux éléments verticaux de contreventement. Ce point n'est pas négligeable car les ouvrages vernaculaires en maçonnerie présentent, dans la plupart des cas, des planchers en bois pas assez rigides pour garantir le rôle de diaphragme¹⁸⁹ (Vintzileou 2008).

À ce propos, on peut évoquer un élément corollaire. En raison de l'absence de véritables diaphragmes dans ce type de structure, le problème de la torsion est fortement réduit ; en conséquence, la résistance d'un ouvrage ainsi édifié ne dépendrait que de manière limitée de sa conformation¹⁹⁰. En effet, l'irrégularité architecturale de bâtiments en maçonnerie comprenant des insertions horizontales ne semble pas avoir eu de répercussions importantes sur leur performance lors d'événements sismiques.

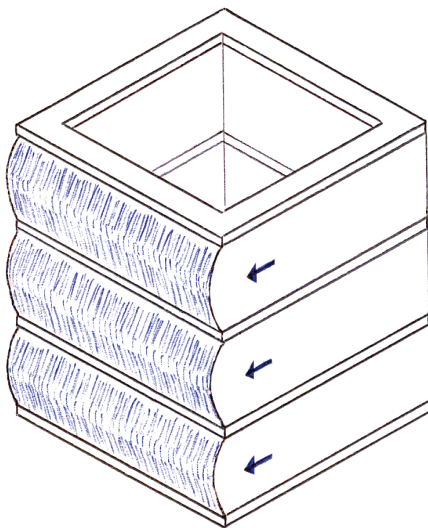


Fig.134 Schéma : risque réduit de renversement de la maçonnerie, grâce à la bonne liaison entre les murs orthogonaux, assurée par les insertions.

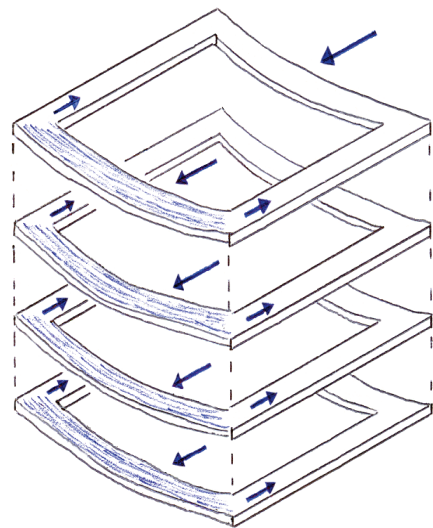


Fig.135 Schéma : transmission des charges aux murs parallèles aux sollicitations sismiques, grâce à la continuité des insertions.

¹⁸⁸ Des modélisations numériques indiquent que les contraintes de flexion sont élevées dans les insertions spécialement en correspondance des liaisons d'angle (Vintzileou 2008).

¹⁸⁹ En effet, pour assurer ce rôle, les diaphragmes doivent être plus rigides que les éléments verticaux de contreventement.

¹⁹⁰ Généralement, la vulnérabilité sismique d'une construction est réduite si sa conformation est compacte et régulière : le centre de gravité et le centre de rigidité se trouvant au même endroit, le bâtiment est moins sensible aux problèmes de torsion (Lestuzzi 2013).

2.1.2. RÔLE DES INSERTIONS DANS LE COMPORTEMENT DE MURS SOLLICITÉS DANS LE PLAN

Les murs en maçonnerie en moellons ou en briques de terre crue sollicités dans le plan sont généralement exposés à deux modes de rupture principaux en cisaillement¹⁹¹ : la rupture qui se produit par une fissuration diagonale et la rupture par glissement sur les joints d'assise (Lestuzzi 2013). En présence d'insertions horizontales en forme d'échelle, le risque que ces modes de rupture se développent est considérablement réduit en raison, très vraisemblablement, des aspects suivants.

TRANSFERT DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT

Le frottement entre les segments horizontaux de maçonnerie hourdée et les insertions assume un rôle important dans la capacité d'un mur à résister à des sollicitations dans le plan. Lors d'un événement sismique, si le taux de frottement entre les unités maçonnées et les tasseaux intégrés est suffisant, les contraintes de cisaillement sont transférées au système en bois. Généralement, ce sont les insertions situées dans les parties inférieures du mur qui sont le plus sollicitées car, à ces endroits, le niveau d'adhérence entre le bois et les unités de la maçonnerie est majeur (Vintzileou 2008). Si, en revanche, le taux de frottement s'avère insuffisant par rapport aux sollicitations sismiques, le plan de friction au niveau des insertions peut alors devenir un plan de glissement ; ce type de réponse permet de réduire le risque que des fissures préjudiciables aient lieu dans les segments de la maçonnerie, évitant ainsi une déstabilisation aggravée du mur (Isik 2009).

SUBDIVISION DU MUR EN SEGMENTS AVEC UN CERTAIN DEGRÉ D'INDÉPENDANCE

La présence des insertions permet aux différents segments horizontaux du mur de répondre aux sollicitations sismiques avec un certain degré d'indépendance. Les charges sont distribuées de manière différenciée dans chacun des segments en évitant la formation, au sein du mur, d'une seule et unique grande fissuration diagonale destructive (Abdessemed Foufa & Benouar 2006; Hughes 2000; Langenbach 2000). La rupture en cisaillement de ce type de mur aurait lieu uniquement en présence d'accélération sismiques particulièrement élevées (Coburn & Spence 1987a). D'après des modélisations¹⁹², un ouvrage en pierres sèches avec insertions parviendrait à résister à un tremblement de terre avec des accélérations du sol équivalentes à $2,6 \text{ m/s}^2$, alors qu'il s'effondrerait avec un séisme d'une puissance égale mais avec des accélérations beaucoup plus élevées, de 8 m/s^2 (Parajuli 2009).

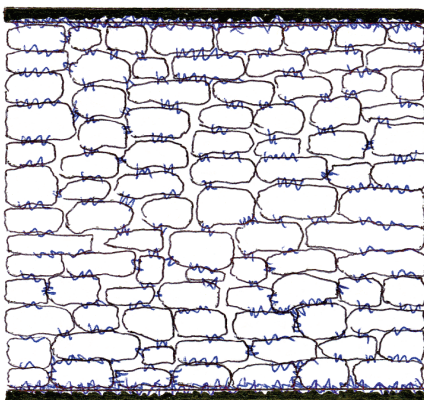


Fig.136 Schéma : zones de frottement favorisant le transfert des contraintes de cisaillement aux insertions.

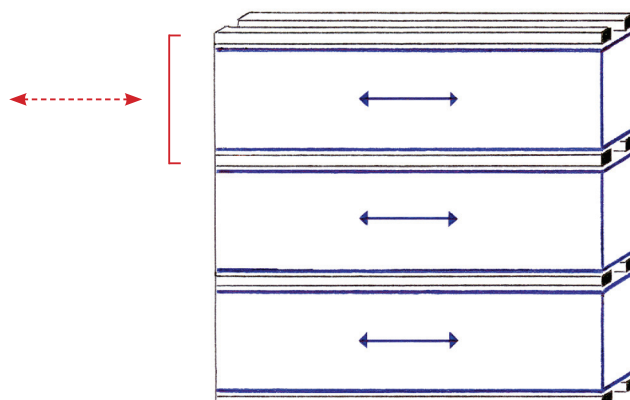


Fig.137 Schéma : mouvement différencié des segments de maçonnerie hourdée, réduisant le risque de fissuration diagonale destructive.

¹⁹¹ La rupture en flexion (ou balancement) est peu probable avec ce type de maçonnerie.

¹⁹² Ces modélisations numériques prennent en référence les séismes de Kobe (M 6.8) ayant eu lieu au Japon en 1995 et celui de El Centro (M 6.9) qui a frappé le Mexique en 1940 (Parajuli 2009).

CONFINEMENT DE LA MAÇONNERIE

En assurant un certain rôle de confinement de la maçonnerie non hourdée, les insertions permettent une dislocation partielle des unités maçonnées sans toutefois que celle-ci conduise à la désagrégation totale du mur (Lüchinger & Sturny 2014). La dimension globale des ouvertures, avant que l'écroulement se produise, peut en effet être beaucoup plus importante (au moins cinq fois) que dans le cas de murs qui sont dépourvus d'insertions horizontales (Vintzileou 2008). Cette aptitude à limiter la dangerosité de phénomènes d'instabilité potentiellement destructifs est décisive, car elle permet un mouvement accru des unités de la maçonnerie et, par cela, une plus grande dissipation de l'énergie sismique par frottement externe. De plus, elle favorise le découplage de vibrations de l'ensemble du bâti de celles du tremblement de terre. En particulier, les parties de la maçonnerie partiellement disloquée se situant proches du sol agiraient en tant que véritables isolateurs sismiques atténuant les forces auxquelles le mur doit faire face (Pankaj & Thakkar 2003).

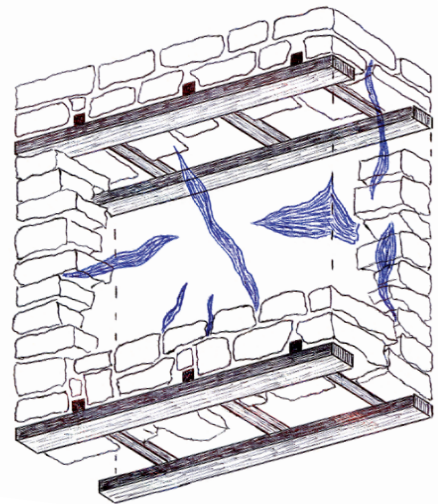


Fig.138 Schéma : risque limité d'écroulement de la maçonnerie non hourdée, grâce à l'action de confinement des insertions.

2.1.3. PARAMÈTRES DÉTERMINANT L'EFFICACITÉ SISMIQUE DU PROCÉDÉ CONSTRUCTIF

En fonction des différents rôles que les insertions horizontales en bois en forme d'échelle semblent assumer, on peut reconnaître cinq facteurs principaux susceptibles de modifier considérablement leur apport à la performance sismique d'un mur :

- la dimension des tasseaux de bois ;
- la liaison d'angle des insertions ;
- leur cohésion transversale ;
- leur raccordement longitudinal ;
- leur emplacement dans le plan vertical.

Ces cinq facteurs peuvent être considérés comme les principaux paramètres qui déterminent l'efficacité du procédé constructif examiné envers le phénomène sismique. Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'ils coïncident avec des aspects constructifs qui, dans les architectures analysées le long de la faille nord anatolienne (cf. partie II, étude de cas), représentent ceux étant les plus susceptibles de varier entre sites avec une sismicité historique différente.

L'intérêt d'identifier et comprendre ces paramètres réside dans leur utilité au niveau opérationnel, tant pour des activités visant à l'estimation des dégâts sismiques (avant et après un tremblement de terre) et à la détermination de l'habitabilité du bâti affecté, comme pour des travaux de mise en sécurité, souvent nécessaires afin de rendre accessibles les lieux suite à un impact.

À titre indicatif, les avantages de leur prise en compte sont mentionnés ci-après, en relation à chacune de ces activités.

- **POUR L'ESTIMATION DES DÉGÂTS SISMIQUES**

L'estimation des dégâts est effectuée afin de définir les politiques de gestion du risque, au travers de la simulation de scénarios post-séisme, ainsi que, dans la phase suivant immédiatement l'événement sismique, pour mieux organiser les activités de sauvetage (Studer et al. 2010; Woo 2011). Cette étude est réalisée sur la base des spécificités du tremblement de terre de référence¹⁹³ ainsi qu'en fonction des caractéristiques de l'environnement bâti, donc, en se rapportant à l'efficacité sismique des procédés constructifs des ouvrages qui le composent.

Dans le cas des structures examinées dans cette partie, la conformité des insertions en bois aux critères reconnus comme garants d'un certain niveau de sécurité, peut donner des renseignements utiles pour la compréhension de leur apport dans la réponse sismique des bâtiments, au cas par cas. Ce constat souligne l'importance de combiner des données scientifiques relatives au procédé constructif avec des renseignements au regard des modalités selon lesquelles il a été mis en œuvre par les bâtisseurs vernaculaires. Si les premières permettent de mieux cerner les paramètres déterminant son efficacité sismique, les deuxièmes sont nécessaires pour définir les critères qui peuvent être considérés comme garantie de sécurité. En effet, examiner les différentes variantes constructives présentes dans un lieu donné permet d'avoir des indications sur celles qui sont susceptibles d'être les plus adaptées au niveau local de risque sismique.

- **POUR LA DÉTERMINATION DE L'HABITABILITÉ DU BÂTI**

L'habitabilité des constructions affectées par un événement sismique est vérifiée à partir d'une première analyse des dégâts permettant d'effectuer une évaluation rapide de la possibilité d'une réutilisation immédiate (Martinelli et al. 2009). Le niveau d'endommagement subi, déterminé à partir de l'observation des types de dégâts, est le critère couramment considéré comme référence pour déterminer si un bâtiment est utilisable, accessible uniquement pour un usage restreint ou complètement inutilisable¹⁹⁴. Toutefois, d'autres approches ont été élaborées pour parvenir à des résultats plus précis : ces procédures ne se basent pas uniquement sur une description des dégâts, mais elles incluent également des appréciations qualitatives, de la part de l'examineur, quant à leur évolution probable¹⁹⁵ (Munari 2010).

Dans l'analyse du niveau des dommages subis par un bâtiment, se référer aux caractéristiques des insertions horizontales en bois et aux modalités selon lesquelles elles ont été intégrées dans les murs (dimensions des tasseaux, espacement, etc.) peut faciliter une meilleure compréhension de la dangerosité des dégâts, en limitant ainsi le risque d'une perception erronée quant à la portée réelle de l'impact sismique sur la stabilité des structures (Crocker 2000; Lagomarsino et al. 2004; Langenbach 2010). Cette démarche permet de parvenir à des décisions cohérentes avec la situation effective de chaque construction, en diminuant les probabilités que des décisions inappropriées soient prises, telles que la démolition des constructions pouvant encore assurer une bonne stabilité¹⁹⁶.

En fait, les dégâts qui sont préjudiciables pour la stabilité de bâtiments en maçonnerie ordinaire, tels que la chute de portions de mur, assument une dangerosité relative en présence d'insertions horizontales en bois. Une estimation surévaluée des dégâts peut ainsi conduire à des choix impliquant des effets néfastes sur le patrimoine architectural d'une région.

Par exemple, lors d'un tremblement de terre (M 6) qui a eu lieu en 1955 au Nord Est de la Grèce (région de Pélion), de nombreuses habitations en maçonnerie avec insertions ont été démolies car retenues

193 Notamment, la magnitude du séisme, son hypocentre ainsi que la distance entre l'épicentre et le site considéré.

194 À titre indicatif, on peut mentionner deux procédures se différenciant par les critères de référence pris en compte pour déterminer le niveau d'endommagement des bâtiments : le manuel publié par la Confédération Suisse (Studer et al. 2010), se référant à l'échelle d'intensité macrosismique EMS-98 et qui considère les ouvrages selon des classes typologiques génériques (ossature en béton armé, maçonnerie de pierre, etc.) et un manuel élaboré par un consultant de l'UNESCO (Pichard 1984) avec une attention particulière à l'égard des monuments anciens, développé à partir de l'analyse des types de dégâts qu'ils ont subis lors d'un séisme en 1979 au Monténégro.

195 Un exemple de ce type de procédures est celle élaborée par le Département de la Protection Civile italienne pour l'étude des bâtiments en maçonnerie, dénommée *AeDES 05/2000 - Manuale per la compilazione della scheda di 1 livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica* (Chianello et al. 2009).

196 La conséquence de ce type de réaction comporte une réduction considérable du parc immobilier, aspect qui n'est pas anodin dans des contextes post-séisme, où souvent le nombre de personnes à reloger est très élevé.

dangereuses par les inspecteurs de l'autorité locale, bien qu'elles n'avaient pas toutes subi des dégâts structuraux importants (Kizis 1977).

D'autre part, une perception erronée des effets des dommages observés sur la stabilité d'une structure peut également amener à définir comme habitables des constructions qui ne le sont plus, en mettant ainsi en péril la vie des gens en raison d'une sous-estimation. Des répliques sismiques peuvent, en effet, se produire quelques minutes comme des mois après le premier choc, en provoquant l'écroulement total des bâtiments fissurés en raison de l'effet cumulatif des dégâts¹⁹⁷ (Love et al. 2004).

- **POUR LES TRAVAUX DE MISE EN SÉCURITÉ**

En ce qui concerne les travaux de mise en sécurité, pouvoir mesurer la dangerosité des dégâts se révèle nécessaire afin d'identifier les points critiques sur lesquels concentrer les interventions (Binda 2000; Lagomarsino et al. 2004). Dans ces cas de figure, se référer aux fonctions structurelles que les insertions horizontales assument dans le comportement statique et dynamique d'un bâtiment permettrait, non seulement de réduire les probabilités d'entreprendre des opérations de stabilisation inefficaces, mais également de réduire les dépenses, en évitant par exemple l'adoption d'étayages inutiles. À ce propos, on peut également évoquer l'intérêt de développer des travaux de consolidation sismique du bâti dans la phase immédiatement après un tremblement de terre ; ce qui éviterait le risque que les ressources disponibles à cet effet se révèlent, par la suite, insuffisantes. En effet, l'achat et la location des systèmes de mise en sécurité des constructions endommagées impliquent souvent des coûts très élevés¹⁹⁸.

ENTRE INTUITION CONSTRUCTIVE, SAVOIR SCIENTIFIQUE ET RECONNAISSANCE INSTITUTIONNELLE

Dans l'ensemble des activités liées à la gestion et prévention du risque, une démarche analytique et opérationnelle qui prenne en compte les cultures constructives vernaculaires et leurs propres spécificités présente de fait plusieurs intérêts. Pour qu'une telle approche soit promue de manière généralisée, la reconnaissance officielle de la part des institutions gouvernementales du caractère parasismique des différents procédés constructifs se révèle toutefois nécessaire, comme également la prise de conscience de la société civile envers les qualités intrinsèques au bâti ancien.

Dans le chapitre suivant, les enjeux techniques et culturels du processus de normalisation des procédés constructifs vernaculaires sont introduits, afin de dégager les défis contemporains dans la revitalisation de l'ensemble des savoirs et savoir-faire qui y sont associés. Les considérations formulées se rapportent au type de structure examiné dans cette partie de la thèse, néanmoins, elles sont également valables dans d'autres cas.

¹⁹⁷ C'est ce qui s'est effectivement produit dans la région du Frioul (Italie) en 1976, entre la première secousse du mois de mai et une forte réplique ayant eu lieu quatre mois plus tard, en septembre (Pichard 1984).

¹⁹⁸ En outre, la pérennisation des systèmes de mise en sécurité engendre un risque accru en cas de tremblements de terre ultérieurs, en raison d'une diminution de leur efficacité à stabiliser les bâtiments endommagés due, par exemple, au relâchement des boulons, à la rouille des étais métalliques ou à la dégradation des éléments en bois.

2.2. ENJEUX TECHNIQUES ET CULTURELS DANS LA RECONNAISSANCE INSTITUTIONNELLE

Le procédé constructif consistant à introduire des éléments horizontaux en bois en forme d'échelle dans les murs en maçonnerie a été inclus dans le cadre normatif, en matière de construction parasismique, de trois pays. C'est le cas de la Turquie et de l'Inde, où ils existent des normes relatives aux constructions en maçonnerie en moellons et en briques de terre crue¹⁹⁹, datant respectivement de 1972 et de 1993 (Murty 2005; Langenbach 2009). En revanche, au Pakistan, ce procédé a été officiellement reconnu et approuvé beaucoup plus récemment, au cours du processus de reconstruction qui a suivi le tremblement de terre de 2005. Toutefois, dans de nombreux autres pays, cette étape n'a pas encore été franchie.

De nos jours, la normalisation de ce procédé constructif en tant que technique adaptée aux zones sismiques présente plusieurs intérêts, dans le court et long terme :

- elle encourage la reconnaissance des cultures constructives vernaculaires parasismiques et donc leur évolution, revalorisation et revitalisation dans le long terme. Pouvoir continuer à mettre en œuvre une pratique garante d'un certain niveau de sécurité sismique est un facteur crucial pour le renforcement de la résilience des lieux ainsi que des milieux humains. En fait, compte tenu que la période de retour des tremblements de terre violents est généralement très longue (plusieurs décennies, voire des siècles), les ouvrages qui subiront les effets des prochains événements sismiques ne sont pas uniquement ceux existants aujourd'hui, mais également ceux en train d'être réalisés ou qui le seront dans les années et les décennies à venir ;
- elle incite à mieux prendre en compte les bâtiments correspondant à ce type de structure particulier dans les réflexions conduites par les milieux scientifiques et politiques suite à un tremblement de terre. En fait, les structures qui ne sont pas conformes aux lois en vigueur sont très souvent contemplées comme étant « illégitimes », et donc souvent écartées *a priori* de la liste des éventuels procédés constructifs à promouvoir et à adopter dans les activités visant à une réduction de la vulnérabilité sismique des environnements bâtis ;
- elle évite la proscription généralisée de matériaux de construction localement disponibles et traditionnellement employés. Au Chili, où ce procédé constructif était adopté par les bâtisseurs vernaculaires avec des briques de terre crue, l'utilisation de ces dernières pour la réalisation de murs porteurs a été interdite en raison de leur mauvaise performance lors de tremblements de terre récents²⁰⁰. Bien qu'effectivement les briques de terre ne possèdent pas une bonne résistance aux contraintes de cisaillement²⁰¹ (Houben & Guillaud 1989; Minke 2001), la vulnérabilité des bâtiments ainsi édifiés peut être réduite, par exemple, en améliorant la qualité de la terre employée²⁰² et/ou en utilisant des dispositifs constructifs particuliers, comme les insertions horizontales en bois examinées dans cette partie (Aytun 1981).

199 Les normes indiennes (Indian Standard National Building Codes no. 13827 *Improving Earthquake Resistance of Earthen Buildings_Guidelines* et no. 13828 *Improving Earthquake Resistance of Low-strength Masonry Buildings_Guidelines*) précisent que les insertions en bois devraient être disposées aux niveaux du plancher, de la toiture et du linteau. La dimension des tasseaux recommandée est de 7.5 x 3.8 cm minimum pour ceux longitudinaux, et de 5 x 3 cm pour les traverses de connexion, à placer tous les 50 cm. Dans les normes turques (Turkish Standard TS 2515 *Adobe Buildings and Construction Methods*) les dimensions prescrites sont plus importantes : 10 x 10 cm pour les tasseaux longitudinaux et 10 x 5 cm pour les traverses.

200 Source : www.world-housing.net.

201 La destruction des structures en maçonnerie en briques de terre crue est due à deux raisons principales. D'une part, les briques ont un comportement fragile car leur résistance à la traction et leur niveau de ductilité sont très faibles, d'autre part, la mauvaise liaison entre les briques (due à l'emploi d'un mortier de terre à faible résistance mécanique) peut conduire à une destruction partielle ou totale du mur déjà à partir des premières secousses (Cao & Watanabe 2004).

202 La composition granulométrique de la terre, la quantité et le type d'argile ainsi que le type d'additif ajouté, peuvent influencer de manière importante sur le comportement dynamique d'une structure en terre crue (Blondet et al. 2003).

Deux aspects relatifs au processus de normalisation de ce procédé constructif, et plus largement à la reconnaissance institutionnelle des savoirs et savoir-faire vernaculaires, méritent d'être approfondis. D'un côté, son inclusion dans le cadre normatif en tant que technique parasismique doit être associée à des activités subsidiaires encourageant une adoption et une mise en œuvre cohérentes de la part de la population. D'autre part, le caractère parasismique des architectures locales correspondant à ce type de structure doit être non seulement apprécié de manière approfondie mais également soigneusement documenté.

Avant de développer ces deux aspects, il paraît d'abord utile d'exposer quelques points distinctifs d'un programme de reconstruction mis en place par le gouvernement pakistanais après le tremblement de terre de 2005 (M 7.6) dans le Nord du pays²⁰³. À cette occasion, les deux aspects auxquels je fais référence dans ce chapitre se sont manifestés de manière très explicite ; ce qui, d'ailleurs, rend ce programme de reconstruction avant-coureur dans l'approche adoptée par les organismes institutionnels à l'égard des pratiques constructives vernaculaires. Plus précisément, il peut être perçu comme la concrétisation d'une revitalisation du lien entre les institutions publiques contemporaines et les cultures du risque qui se sont développées dans le passé.

2.2.1. PROGRAMME DE RECONSTRUCTION AU PAKISTAN SUITE AU SÉISME DE 2005

Ce programme de reconstruction, réalisé en collaboration avec UN-Habitat²⁰⁴ et la Direction du développement et de la coopération Suisse (DDC)²⁰⁵, présente plusieurs points particulièrement intéressants.

D'abord, il s'est avéré très efficace sur le plan quantitatif : en cinq ans, sur les 463'000 maisons détruites, 418'000 ont été reconstruites et l'ensemble des 148'000 maisons endommagées a été entièrement réparé, permettant ainsi le relogement de 3,5 millions de personnes (ERRA 2011). D'autre part, cette réussite a été possible grâce à la revalorisation rationnelle et créative de l'ingéniosité intrinsèque au bâti vernaculaire : environ 165'000 maisons ont été reconstruites en réinterprétant les procédés mis en œuvre depuis des siècles par les populations locales et qui étaient presque en voie de disparition lorsque le séisme frappa.

L'approche adoptée repose sur cinq concepts clés définis à partir du constat que 95 % de l'environnement bâti de la région frappée avait été réalisé sans l'appui d'architectes et d'ingénieurs (Stephenson et al. 2008; Stephenson 2008; Schacher et al. 2010) :

- la reconstruction des maisons devait être gérée par les personnes victimes du tremblement de terre (*owner-driven reconstruction process*) ;
- les maisons reconstruites devraient être plus résistantes que celles détruites par le séisme (*build back better*) ;
- les habitants pouvaient compter sur une aide financière de la part du gouvernement (système de subventions) ;
- les constructeurs étaient encouragés à suivre des formations sur les techniques constructives retenues par le gouvernement en raison de leur efficacité sismique (formation technique) ;
- les chantiers devaient être suivis par des représentants de l'armée pakistanaise en charge de vérifier la qualité des travaux et de valider leur conformité aux recommandations techniques, critère nécessaire pour que les propriétaires reçoivent des subventions (supervision / monitoring).

203 Ce séisme a eu lieu le 8 octobre 2005 dans le Pakistan septentrional et a provoqué plus de 73'000 morts et 125'000 blessés. Tout de suite après, le gouvernement du Pakistan a constitué l'organisme *Earthquake Reconstruction and Rehabilitation Authority* (ERRA) dont la mission était de gérer tous les efforts relatifs à l'évaluation des dommages, à la reconstruction et réparation des maisons ainsi qu'à la réhabilitation des zones affectées.

204 Partie intégrante des Nations Unies, UN-Habitat promeut un développement des établissements humains qui soit durable au point de vue environnemental et social, en se focalisant en particulier sur l'accès « pour tous » à un habitat convenable.

205 La Direction du développement et de la coopération suisse (DDC) est l'organe du Département fédéral des affaires étrangères en charge de la coopération internationale, de la coopération au développement avec le Sud et l'Est, de la coopération multilatérale ainsi que de l'aide humanitaire : prévention, aide d'urgence, reconstruction et plaidoyer sont les quatre domaines d'engagement.

Tout de suite après le tremblement de terre de 2005, les techniques de construction officiellement approuvées par l'autorité gouvernementale pour la reconstruction des maisons, et pour lesquelles des subventions et des formations étaient prévues, correspondaient à des procédés employant des matériaux industriels, notamment le ciment, le fer et les briques de terre cuite²⁰⁶ (Schacher 2008c; Schacher et al. 2010). Avec l'avancement du programme, plus les secours quittaient les centres urbains pour pénétrer dans des régions rurales, plus on se rendit compte des limites pratiques des techniques proposées, car l'ensemble de ces matériaux aurait dû être transporté dans des sites de montagne d'accès difficile. Ce qui a conduit l'organisme gouvernemental en charge de la reconstruction à s'intéresser à trois autres procédés constructifs caractérisant le bâti vernaculaire, parmi lesquels figure également celui consistant à intégrer des insertions horizontales en bois en forme d'échelle dans les maçonneries de pierre²⁰⁷.

En dépit de la bonne performance sismique des bâtiments ainsi édifiés, très rapidement, on se heurta à un manque de connaissances et d'études scientifiques à leur égard (Schacher 2008c). Des recherches plus approfondies ont donc été entreprises pour estimer le potentiel du procédé dans la reconstruction et, parallèlement, des renseignements plus précis ont pu être diffusés parmi les parties prenantes, spécialement aux représentants gouvernementaux jouant un rôle déterminant dans le processus décisionnel²⁰⁸. Ainsi, après dix mois de discussions entre les ingénieurs du gouvernement pakistanais, les représentants de l'armée et les consultants des organisations internationales impliquées (UN-Habitat et DDC en première ligne), ce procédé constructif vernaculaire a été enfin accepté en tant que technique parasismique, pleinement reconnue par les autorités et les milieux scientifiques locaux.



Fig.139 a) Bâtiment ayant résisté au tremblement de terre de 2005 (Crédit : Schacher) ; Chantier-formation mis en place pendant le programme de reconstruction (b) et ouvrage réalisé par les maçons formés (c, Crédits : Schacher) ; Détail de l'assemblage à trait de jupiter, très résistant à la traction, dans une construction ancienne (d, Crédit : Schacher) et sa réinterprétation contemporaine (e, Crédit : Stephenson).

206 Les techniques sont celles de l'ossature en béton armé (*Reinforced Concrete Frame*), de la maçonnerie armée (*Reinforced Masonry*) et de la maçonnerie chaînée (*Confined Masonry*).

207 Les deux autres types de structures vernaculaires retenus correspondent aux ossatures bois avec remplissage de pierre (et mortier de terre) et aux systèmes à poteaux-poutres en bois avec parois en rondins équarris.

208 En outre, l'inexistence de documents techniques relatifs à ce procédé constructif ont conduit à l'élaboration d'un manuel illustré à l'usage des constructeurs, présentant les règles de base à suivre et les différentes étapes de réalisation (Schacher & Ali 2009).

2.2.2. ARTICULATION ENTRE CADRE NORMATIF ET RENSEIGNEMENTS RELATIFS AU CARACTÈRE PARASISMIQUE

Le cas du Pakistan explicite la nécessité de constituer une documentation mettant en évidence le caractère parasismique des procédés constructifs vernaculaires, généralement méconnus non seulement de la part des représentants des institutions publiques mais également de leurs consultants techniques (Schacher 2008c). Cet aspect est essentiel, en raison de la forte articulation qui subsiste entre la nature des renseignements relatifs à une pratique constructive vernaculaire et son niveau de prise en compte au niveau institutionnel. En effet, l'exactitude et la quantité des informations disponibles influent de manière importante sur les processus décisionnels en matière de normes et règlements de construction ; et ceci bien plus que l'effective performance des structures vernaculaires lors d'événements sismiques.

Les essais expérimentaux effectués en laboratoire, les modélisations numériques et les analyses *in situ* des dégâts, contribuent de manière fondamentale au développement des connaissances sur le caractère parasismique des différents types de structures. Toutefois, nombreuses sont encore les limites que ces démarches présentent dans l'étude du comportement dynamique des bâtiments réalisés avec le procédé constructif examiné ici.

En ce qui concerne les modélisations, trois obstacles principaux peuvent être reconnus. Premièrement, la simulation de la réponse sismique de murs en maçonnerie en moellons ou en briques de terre crue coïncide avec une tâche particulièrement compliquée, en raison de leur comportement non linéaire²⁰⁹ (Lagomarsino et al. 2004). Deuxièmement, la présence d'insertions horizontales en bois constitue une contrainte supplémentaire : des analyses ont mis en évidence la difficulté d'élaborer un modèle mathématique représentatif du comportement de ce type de mur, en raison de la complexité à reproduire l'interaction entre les différents matériaux (Kontogiannis 2010). Troisièmement, les logiciels informatiques couramment utilisés ne permettent pas d'introduire les données nécessaires pour fidèlement simuler le comportement dynamique d'une structure en matériaux mixtes (pierre, bois, terre crue)²¹⁰, ainsi des généralisations et des simplifications doivent être souvent faites, ce qui conduit inévitablement à des résultats biaisés (Ibid.).

Les essais expérimentaux de type statique-cyclique présentent certaines limites ne permettant pas d'aboutir à une complète compréhension du comportement de ce type de mur sollicité dans le plan. En effet, ils ne considèrent pas certains facteurs susceptibles d'influer de manière marquée leur performance, tels que la continuité des insertions horizontales entre les murs orthogonaux. Ce paramètre peut être apprécié avec des tests dynamiques effectués à l'aide de tables vibrantes, mais les coûts que ceux-ci impliquent les rendent souvent inabordables. De plus, pour que les résultats des essais en laboratoire reflètent le comportement effectif d'un bâtiment, ou d'un élément structural, les matériaux ainsi que les modalités et les séquences de leur mise en œuvre doivent concorder avec ceux qui étaient adoptés par les bâtisseurs vernaculaires (Coburn & Spence 1987a). Ce qui est parfois extrêmement difficile à reproduire à cause d'un manque, d'une part, d'expérience des scientifiques et techniciens conduisant les expérimentations et, d'autre part, de compétences spécifiques parmi les constructeurs actuels.

Dans le processus d'investigation du caractère parasismique de ces structures, les états des lieux des effets sismiques sur le bâti effectués lors de missions de reconnaissance post-séisme assument, par conséquent, une importance toute particulière. Les tremblements de terre représentent, encore aujourd'hui, des occasions uniques pour acquérir des enseignements précieux qui seraient autrement difficiles à obtenir. L'analyse des dégâts permet de recueillir de nombreuses données qualitatives et quantitatives sur les mécanismes de rupture à l'origine de l'effondrement des bâtiments et, spécialement, sur les particularités structurelles qui améliorent ou affaiblissent leur performance sismique (Lagomarsino 2006; Sarà 2012). En relation à ces dernières, plusieurs procédures ont été élaborées afin de pouvoir documenter de manière méthodique les caractéristiques d'un bâtiment endommagé, facilitant ainsi l'identification des facteurs influençant son comportement dynamique (Porter 2002). En effet, certaines fiches d'analyse des dégâts appuient un examen très approfondi et complet de l'état de bâtiments

²⁰⁹ Le comportement dynamique des maçonneries est défini comme étant non linéaire car elles ne demeurent pas dans l'état élastique pendant un séisme, en raison des fissures qui peuvent se générer à leur intérieur (Ferrigni et al. 2005).

²¹⁰ En effet, les analyses numériques davantage détaillées sont très onéreuses (Hicyilmaz 2011).

en maçonnerie, en se rapportant, entre autres, aux différents types d'appareillage (Binda 2000). Force est cependant de constater l'absence de documents de ce genre se référant aux structures caractérisées par des insertions horizontales en bois, et ceci malgré elles constituent une grande partie des environnements bâtis aujourd'hui exposés aux séismes. Pendant les missions de reconnaissance post-séisme, les constructions de ce type ne sont que très rarement considérées et, quand c'est le cas, elles sont rapportées à des catégories généralistes qui ne considèrent pas les particularités structurelles qu'elles présentent (Langenbach 2002). Cette démarche ne facilite guère la mise en relation des caractéristiques constructives avec les dégâts subis, en entravant ainsi une meilleure compréhension des mécanismes et des modes de rupture propres à ce procédé constructif et des facteurs modifiant sa performance.

De plus, si ce type de structures est très rarement pris en compte dans les évaluations des dégâts sismiques, il l'est encore moins quand elles ont bien résisté. L'analyse des spécificités propres aux bâtiments qui n'ont pas subi des dégâts importants est pourtant fondamentale, car elle permet de saisir les facteurs à l'origine de leur bonne performance : aspect essentiel pour pouvoir documenter le caractère parasismique du procédé constructif adopté et, donc, pour encourager sa reconnaissance institutionnelle.

2.2.3. ARTICULATION ENTRE CADRE NORMATIF, COMPÉTENCES LOCALES ET RESSOURCES FINANCIÈRES

Une considération ultérieure en relation à la normalisation des procédés constructifs vernaculaires possédant un caractère parasismique se rapporte à la nécessité d'adapter le cadre législatif, afin que les personnes qui les adoptent puissent bénéficier d'éventuelles initiatives d'aide financière et de support technique, promues par les institutions publiques. Toutefois, dans certaines circonstances, l'intégration dans les normes d'un certain procédé vernaculaire peut n'avoir guère d'impact sur la vulnérabilité effective de l'environnement bâti, si elle n'est pas accompagnée par la formation des constructeurs²¹¹ et la mise en place d'un système de subventions destinées aux habitants et aux propriétaires ; et ceci non seulement pour les pays dits en voie de développement.

Le rôle des activités de formation des constructeurs locaux est nécessaire, voire indispensable, car souvent les procédés constructifs adoptés par les bâtisseurs vernaculaires coïncident avec des pratiques qui ne sont plus employées et forcément connues aujourd'hui.

D'autre part, les subventions favorisent des travaux de réparation, de restauration et de rénovation qui respectent les spécificités structurelles et matérielles du bâti, donc, sans que son comportement sismique en soit affecté (tab.23). Un programme de subvention peut accélérer davantage le processus de réduction de la vulnérabilité des lieux, aussi en encourageant la réalisation de constructions *ex novo* plus résistantes. Des chercheurs ont, par exemple, estimé qu'un programme de ce genre promouvant le recours aux insertions horizontales en bois dans 13 provinces de la région orientale de la Turquie pourrait éviter l'effondrement de plusieurs dizaines de milliers d'habitations en maçonnerie (Coburn & Spence 1992). Dans ce cas de figure, l'économie résultante d'une diminution du nombre de logements à reconstruire, sur une période de 25 ans, serait supérieure au double du coût initial du programme ; les économies effectuées dépasseraient donc largement les investissements requis.

Le renforcement de l'articulation entre les solutions techniques promues par le cadre normatif, les ressources cognitives locales et les ressources financières (publiques et privées) disponibles constitue un axe stratégique dans le processus d'accroissement de la résilience des sociétés contemporaines. En effet, dans une grande partie des régions assujetties au risque sismique, les connaissances des constructeurs et les disponibilités financières des propriétaires sont les critères qui déterminent la manière dont les bâtiments sont réalisés, réparés ou rénovés ; elles définissent donc sur le long terme le niveau de vulnérabilité effective des lieux (Coburn & Spence 1987a).

²¹¹ L'importance d'inclure des activités de formation dans la phase de reconstruction a été reconnue à partir du séisme de Yémen de 1982 (Shah 2006). Dans le cadre du programme de reconstruction du Pakistan, les formations dispensées aux constructeurs ont été structurées en une partie théorique et une pratique ; cette dernière consistait à réaliser des modèles des parties structurelles les plus critiques et à construire des maisons pour les sinistrés les plus démunis (Schacher 2008c).



Dans le village de Tavşancıl, une mosquée édifée en 1817 est en train d'être réparée après avoir subi des dommages lors du tremblement de terre qui a frappé la province de Kocaeli en 1999 (M 7.4).

Fig.140 Tavşancıl : Mosquée datant de 1817 (a) faisant l'objet d'un renouvellement du bois (b, Source : www.kocaeli.bel.tr).



Dans la ville d'Erzurum, une dizaine de maisons ont été sélectionnées pour être restaurées en vue de sauvegarder des exemples d'architecture vernaculaire. Le long des dernières décennies, nombreuses constructions de ce type ont été détruites à cause de guerres et d'incendies ou démolies en faveur de projets immobiliers. Si dans les années '80, il y en avait environ 500, aujourd'hui pas plus qu'une centaine.

Fig.141 Erzurum : a) Photographie du début du XX^e siècle (Source : www.houshamadyan.org) ; b) Habitation en restauration.



Dans le village de Cumalıkızık, un programme de restauration à l'échelle du village est en cours, depuis 2011. Les projets associés sont très fidèles aux techniques et matériaux traditionnellement employés, jusqu'à dans le moindre détail. Ainsi, par exemple, les briques de terre crue sont produites localement en réutilisant le même type de terre employé par les bâtisseurs vernaculaires.

Fig.142 Cumalıkızık : Mur du rez-de-chaussée d'un immeuble récemment restauré.



Dans la ville de Bursa, un bâtiment datant du XIII^e siècle a été récemment entièrement rénové. Modifié dans la deuxième moitié du XIX^e siècle pour en faire une Madrasa, il avait été abandonné au cours du XX^e siècle. Depuis 2006, il est utilisé comme espace pour des activités culturelles.

Fig.143 Bursa : Madrasa avant (a, Source : Municipalité de Bursa) et après (b) les travaux de rénovation.

Tab.23 Quatre cas de projets menés par les institutions gouvernementales turques visant la réparation de constructions affectées par des événements sismiques, la restauration de celles en mauvais état, ou encore la rénovation intégrale de bâtiments abandonnés. Il est intéressant de noter que des approches différentes sont adoptées : certains programmes convoient exclusivement la réhabilitation physique du bâti tandis que d'autres mettent beaucoup l'accent sur l'importance de renforcer les compétences des constructeurs au regard des procédés constructifs traditionnellement utilisés.

3. LE BÂTI : MANIFESTATION DE CONNAISSANCES EMPIRIQUES CORRÉLÉES AU *FACTEUR SÉISME*

La pratique d'intégrer des éléments horizontaux en bois dans des murs en maçonnerie représente une constante dans l'architecture vernaculaire de multiples régions exposées au risque sismique. La corrélation entre sa diffusion territoriale et la sismicité historique des lieux, ainsi que sa bonne performance lors d'événements sismiques du passé lointain et récent, attestent le niveau élevé de prise en compte du *facteur séisme* par les bâtisseurs vernaculaires. Nombreux sont les rôles assumés par ces insertions horizontales, tant au regard de la résistance statique des murs que de leur comportement sismique. Sur la base d'études scientifiques (essais expérimentaux effectués en laboratoire, analyses numériques et observations des dégâts), on peut remarquer que leur apport dans la performance d'un bâtiment en maçonnerie dépend de multiples facteurs. En vue d'apprécier le niveau de vulnérabilité des ouvrages et, donc, de pouvoir entreprendre des activités de gestion et de prévention du risque les plus appropriées possible, ces facteurs doivent pouvoir être reconnus et leur influence sur la résilience sismique des environnements bâtis comprise en détail.

De ces constatations, émerge l'intérêt d'explorer les modalités selon lesquelles les bâtisseurs vernaculaires ont mis en œuvre ce procédé constructif ainsi que d'investiguer la performance sismique des différentes variantes élaborées, afin de saisir les aspects qui augmentent ou réduisent la vulnérabilité des architectures ainsi édifiées.

Pour ce faire, cette recherche de thèse intègre un cas d'étude où l'environnement bâti vernaculaire est considéré en tant que manifestation de connaissances empiriques étroitement corrélées au *facteur séisme*. Plus précisément, les architectures vernaculaires sont ici examinées comme étant l'expression de savoirs et savoir-faire se rapportant aux effets induits par des sollicitations horizontales sur le bâti et, en particulier, aux mécanismes de rupture qui leur sont propres.

L'étude de cas effectuée en relation à cette dernière partie de la thèse se focalise donc sur des domaines d'analyse découlant du croisement des thématiques suivantes (tab.24):

- les « ressources cognitives », soit les savoirs relatifs au procédé constructif considéré dans cette partie mais également les modalités de leur acquisition et approfondissement ;
- le « phénomène sismique », en tant que tremblements de terre de puissance modérée ayant favorisé, au fil du temps, l'essor de connaissances de plus en plus approfondies sur le comportement dynamique du bâti ;
- le « procédé constructif » consistant à intégrer des insertions horizontales en bois en forme d'échelle dans des murs porteurs en maçonnerie.



Tab.24 Schéma des domaines d'analyse principaux (surface hachurée) découlant du croisement des trois thématiques considérées pour l'étude de cas de cette partie.

ÉTUDE DE CAS :

DIVERSITÉS CONSTRUCTIVES ET EFFETS SISMIQUES

- RÉGION DU LAC D'OHRID, MACÉDOINE ET ALBANIE -

4. INTRODUCTION

Cette étude se focalise sur les éléments variables dans la mise en œuvre des insertions horizontales en bois en forme d'échelle dans des murs porteurs en maçonnerie ainsi que sur leur efficacité, en vue de saisir les facteurs qui augmentent ou, au contraire, réduisent la vulnérabilité des structures réalisés avec ce procédé constructif particulier. Pour ce faire, elle se concentre sur les effets auxquels ces architectures sont exposées en cas de tremblement de terre, par une analyse *in situ* des dégâts sismiques et par un examen des particularités structurelles permettant d'empêcher la formation de mécanismes de rupture.

4.1. LOCALISATION

La région considérée se situe dans le Sud Ouest de la Macédoine et dans la zone orientale de l'Albanie, autour du lac d'Ohrid. Les sites visités pendant l'enquête sur le terrain ont été une vingtaine, 16 en zone rurale et 4 dans des centres urbains²¹².

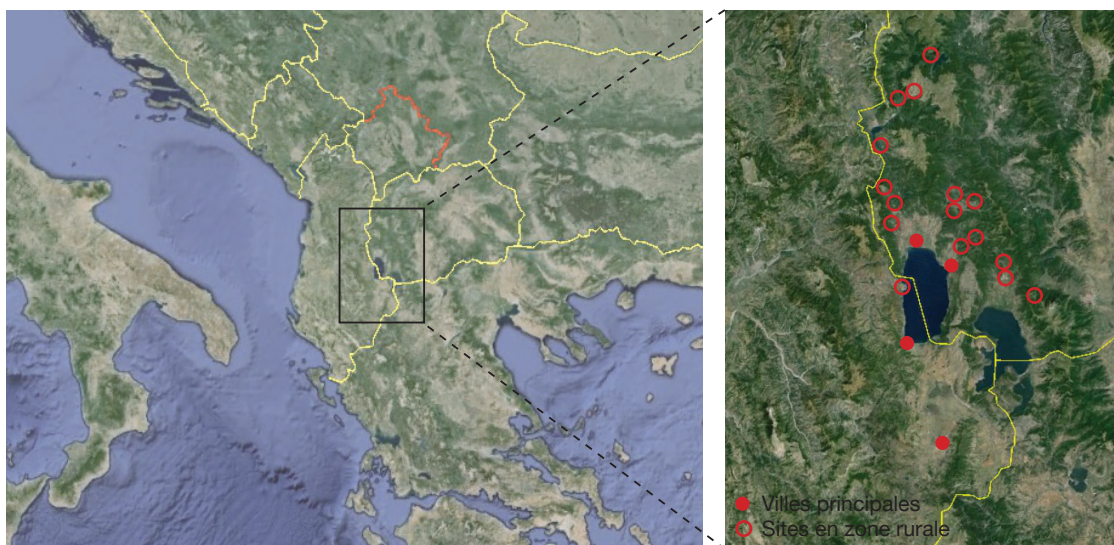


Fig.144 Localisation : a) Zone de frontière entre l'Albanie et la Macédoine, autour du lac d'Ohrid ; b) Carte indiquant l'emplacement des sites considérés (Source : Google Earth).

En relation à l'étude conduite sur le terrain, les éléments les plus intéressants qui ont été identifiés se réfèrent essentiellement au contexte macédonien. De ce fait, la partie qui suit ne traite que de manière marginale le bâti des sites visités sur le territoire albanais.

212 Sites ruraux analysés : Lin (Albanie) ; Kosel, Openica, Izbiste, Jankovec, Malovichté, Beltchichta, Velmey, Kicinica, Galitchnik, Janche, Otisani, Zlesti, Yablanitsa, Boroec, Vevçani (Macédoine).
Sites urbains analysés : Pogradec, Korçë (Albanie) ; Ohrid, Struga (Macédoine).
En outre, l'analyse a été étendue à trois autres sites : les villes de Tirana en Albanie et de Skopje en Macédoine ainsi que le village de Cucer Sandevo en Macédoine.

4.1.1. CARACTÉRISTIQUES DE L'ACTIVITÉ SISMIQUE

Le lac d'Ohrid se trouve dans la zone d'orogénèse des plaques eurasiatique et africaine, et sa formation résulte d'une activité encourue il y a quatre millions d'années. La région environnante est considérée par les sismologues en tant que zone sismogène de premier ordre, c'est-à-dire où des tremblements de terre particulièrement violents pouvant atteindre une magnitude de 8 ont déjà eu lieu ou sont bien probables²¹³ (Milutinovic et al. 1995). Néanmoins, elle se particularise surtout par la très haute fréquence de tremblements de terre d'une puissance modérée-forte : seulement au cours des derniers 50 ans, cinq événements sismiques se sont produits avec des magnitudes mesurant entre 5.3 et 6.5, avec un intervalle temporel d'approximativement dix ans²¹⁴.

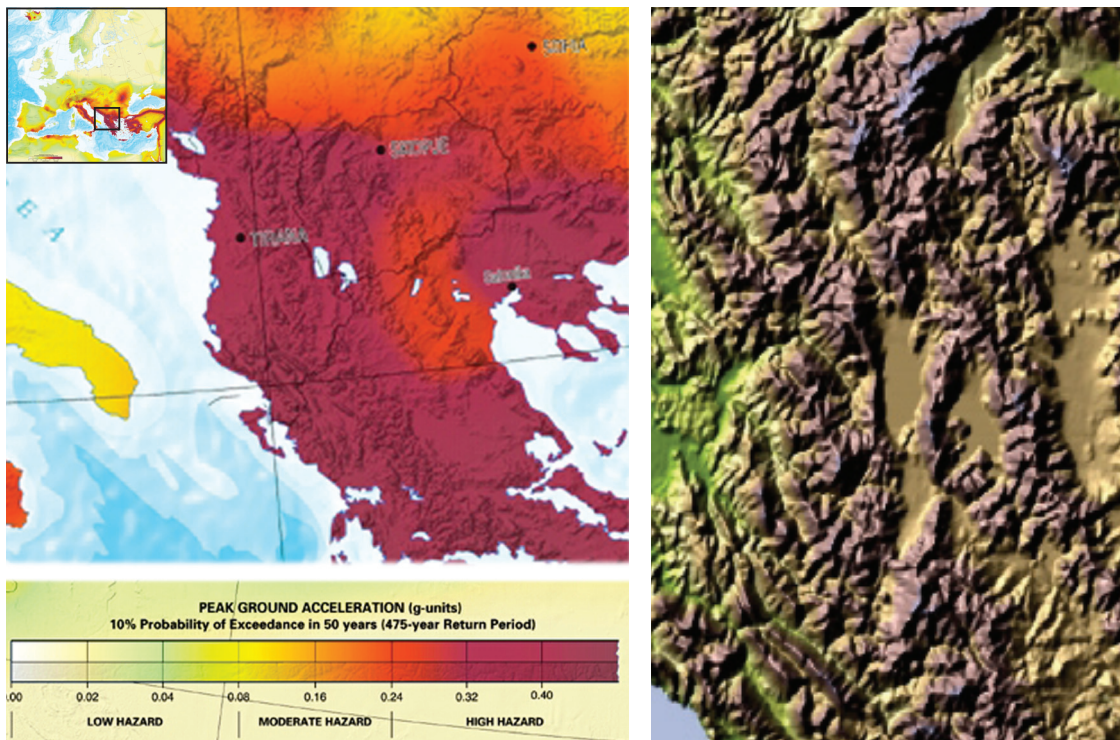


Fig.145 Carte du risque sismique dans la région centrale des Balkans indiquant les valeurs de l'accélération maximale du sol pouvant survenir sur une période de 475 ans (Crédit : Giardini, Jiménez & Grunthal).

Fig.146 Carte du relief du territoire où se situe le lac d'Ohrid (Source : www.treehouse-maps.com).

4.1.2. CARACTÉRISTIQUES DU BÂTI CONSIDÉRÉ

Cette région se caractérise par une quantité particulièrement élevée de bâtiments dont le système porteur vertical se compose de murs en maçonnerie de pierre ou en briques de terre crue comprenant des insertions horizontales en bois en forme d'échelle ; et cela aussi bien en milieu rural que dans les centres urbains. De plan carré, rectangulaire ou en forme de L, la plus grande majorité de ces constructions présentent deux ou trois niveaux, pour une hauteur globale entre 6 et 9 mètres. En ce qui concerne le système porteur horizontal, le plancher se compose, généralement, de solives et d'entretoises sur lesquelles sont disposées des planches en bois de 3-4 cm d'épaisseur. La toiture est constituée d'une charpente en bois sur laquelle sont fixées des nattes de branches soutenant une couche de terre crue et les plaques en ardoise de la couverture ; alors que dans les constructions plus récentes, des tuiles en terre cuite de forme arrondie sont posées sur un platelage en bois.

²¹³ La sismicité de cette région est liée à l'étirement des structures des failles selon l'orientation Nord Ouest - Sud Est.

²¹⁴ En 1967 (M 6.5), en 1979 (M 6.2), en 1982 (M 5.5), en 1998 (M 5.3) et en 2009 (M 5.3) (Source : Centre National américain de traitement de Données Géophysiques NGDC).



Fig.147 Emplacement des sites : a) Les villages sont généralement situés sur des pentes de collines ou de montagnes (Galitchnik) ; b) Les centres urbains se trouvent dans la plaine, notamment près du lac d'Ohrid, et les bâtiments s'adossent les uns aux autres le long de rues et ruelles (Struga).



Fig.148 Architectures vernaculaires en maçonnerie de pierre ou en briques de terre crue avec insertions horizontales en bois en forme d'échelle : a) Habitation en zone rurale (Zlesti) ; b) Habitation en zone urbaine (Struga).

Le procédé constructif examiné n'est plus adopté de nos jours. Il ne fait en effet plus partie des pratiques ordinairement mises en œuvre par les constructeurs depuis quelques décennies. Au cours des premières années du XXI^e siècle, certaines habitations étaient encore bâties en introduisant dans les murs en maçonnerie en briques de terre crue des insertions en bois (Sumanov 2003) ; toutefois, elles constituent des cas relativement exceptionnels. Globalement, les ouvrages les plus récents ainsi réalisés datent, d'après la population locale, des années '70 (fig.149a). De nos jours, des tasseaux en bois similaires sont parfois visibles dans de nouveaux bâtiments, néanmoins, ils sont dans ces cas utilisés uniquement en tant qu'éléments décoratifs introduits dans les parements extérieurs en pierre souvent mis en œuvre comme revêtement d'une structure en béton armé (fig.149b)²¹⁵.

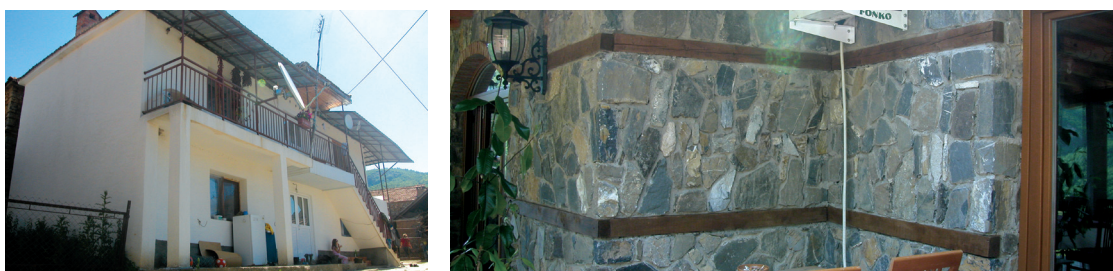


Fig.149 Architectures récentes : a) Maison en maçonnerie en moellons avec insertions en bois, datant de 1974 (Velmey) ; b) Eléments en bois décoratifs dans un bâtiment réalisé au XXI^e siècle (Janche).

²¹⁵ Ce genre de réinterprétation, qui ne profite guère des avantages offerts par le procédé constructif, a été observé aussi en Turquie.

4.2. MODES D'INVESTIGATION SUR LE TERRAIN

L'investigation sur place s'est appuyée sur deux activités principales : une analyse étendue et diffuse des architectures en « situation ordinaire » et une étude de l'environnement bâti en « situation extraordinaire », après l'impact de deux tremblements de terre.

L'analyse du bâti a pris en compte les caractéristiques des systèmes porteurs verticaux et horizontaux mais également la nature des transformations architecturales et/ou structurales apportées récemment (cf. annexe 2.1.). Une centaine de constructions ont été examinées depuis l'extérieur et, lorsque l'accès a été possible, également depuis l'intérieur.

Pendant le travail de terrain, deux tremblements de terre de magnitude 4.5 (profondeur de 1 km) et 4.4 (profondeur de 10 km) ont eu lieu dans la municipalité de Debarsa en Macédoine, respectivement le 7 et le 8 juin 2012, à une vingtaine de kilomètres au Nord du lac d'Ohrid²¹⁶ (fig.150). Une mission de reconnaissance post-séisme visant l'analyse des dégâts a, donc, été effectuée dans 2 villages très proches des épacentres : les villages de Velmey et de Beltchichta. Celle-ci s'est déroulée à deux reprises : le lendemain (9 juin) et une dizaine de jours après (18 juin). La distinction entre les effets induits par l'un ou l'autre des deux tremblements de terre n'a pas été possible, ainsi, les dégâts ont été considérés dans leur ensemble, comme s'il s'agissait d'un seul événement sismique.

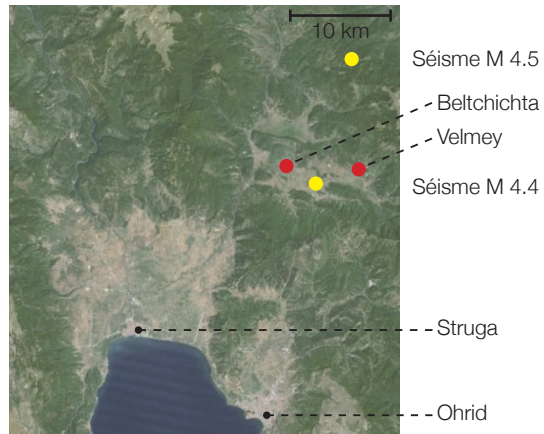


Fig.150 Carte indiquant les épacentres des deux séismes (cercles jaunes) et les deux villages (cercles rouges) où les dégâts sur le bâti ont été analysés (Source : Google Earth).

Lors de cette analyse, j'ai eu l'opportunité de rejoindre un groupe de techniciens en charge de l'évaluation des dommages subis par l'environnement bâti. Composé par un architecte du gouvernement macédonien et deux représentants de la municipalité, ce groupe avait la tâche de définir le montant à attribuer à chaque propriétaire pour entreprendre les travaux de réparation. Environ 20 minutes étaient consacrées à chaque habitation ; pendant ce temps, les propriétaires montraient les dommages qu'ils avaient repérés aux techniciens et ces derniers exprimaient leur avis sur la gravité ainsi que sur les travaux pouvant être entrepris.

De mon côté, j'ai effectué un état des lieux des dégâts. L'inexistence de fiches d'évaluation des dommages rapportées au type de structure examiné dans cette étude de cas, m'a conduit à considérer les paramètres couramment utilisés pour l'analyse des effets sismiques sur le bâti ordinaire (ne faisant pas des distinctions relatives à des techniques particulières) ; ces paramètres ont été néanmoins complétés avec des critères spécifiques aux caractéristiques du procédé constructif (cf. annexe 2.2.).

Les informations dérivant de ces deux analyses (en situation normale et extraordinaire) ont été complétées par des échanges avec les habitants des différents sites visités. Entre autres, ceux-ci ont permis de mieux comprendre la performance des constructions lors d'événements sismiques récents ainsi que les défauts et les pathologies qu'elles présentent aujourd'hui.

Un entretien a également eu lieu avec l'architecte et chercheuse universitaire Melania Sherdenkovska (Université Saints-Cyrille-et-Méthode de Skopje, Macédoine), portant en particulier sur la typologie architecturale du bâti vernaculaire de la région examinée²¹⁷.

²¹⁶ Source : Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM).

²¹⁷ Rencontre ayant eu lieu le 15 juin 2012 à l'Université Saints-Cyrille-et-Méthode de Skopje (Macédoine).

5. ELÉMENTS ÉMERGENTS

Les constructions vernaculaires présentes sur le territoire autour du lac d'Ohrid se caractérisent par des murs en maçonnerie de pierre, notamment en moellons, ou en briques de terre crue. Les pierres sont des granites ou des calcaires prélevés des rivières ou extraites des affleurements rocheux composant le relief montagneux (Namicev 2005). Les briques étaient fabriquées à l'aide de moules permettant d'en produire jusqu'à 10 à la fois, en mélangeant la terre locale avec des brins de paille ou des fibres animales afin d'éviter un retrait excessif lors du séchage (Sumanov 1990). Dans l'élévation des murs, un mortier de terre et paille était utilisé pour la mise en œuvre des briques, alors que la chaux était employée avec les moellons.

Quant aux insertions horizontales en bois intégrées dans les maçonneries, le chêne était généralement préféré pour les tasseaux longitudinaux disposés vers l'extérieur, car cette essence est très résistante aux agents atmosphériques ; en revanche, pour les autres éléments, le bois de châtaignier était ordinairement utilisé (Moutsopoulos 1971). Par ailleurs, ces deux espèces étaient privilégiées également dans d'autres régions des Balkans, notamment en Grèce où, d'après la culture populaire traditionnelle, leur emploi simultané permettait d'augmenter la résistance du bois contre les attaques d'insectes, de bactéries et de champignons (Kizis 1977). En outre, le bois était coupé dans la phase décroissante de la lune ; la tradition indiquant qu'à ce moment il n'y avait pas de vers dans le bois (Namicev 2005) ; des études récentes ont effectivement démontré des variations dans les caractéristiques de certaines espèces de bois en fonction de la phase lunaire au moment de la coupe (Zürcher et al. 2010).

Les propriétés des insertions horizontales dans les bâtiments examinés sont globalement similaires. En revanche, les modalités selon lesquelles elles ont été intégrées dans les murs ainsi que certains détails constructifs peuvent varier considérablement. Aujourd'hui, cette diversité se reflète en des environnements bâtis dont la vulnérabilité envers les tremblements de terre n'est pas homogène. De fait, plusieurs sont les aspects variables dans la mise en œuvre de ce procédé constructif qui ont été reconnus comme exerçant une influence marquée sur son efficacité sismique.

Ci-après, les raisons plausibles et les répercussions d'une telle hétérogénéité sont présentées en les rapportant aux modalités de diffusion des savoirs parmi les groupes de bâtisseurs vernaculaires, aux dégâts induits par les tremblements de terre ainsi qu'aux particularités structurelles permettant d'augmenter la résistance sismique du bâti.

5.1. DIFFUSION DES SAVOIRS PARMIS LES GROUPES DE BÂTISSEURS VERNACULAIRES

Les architectures vernaculaires coïncident avec des artefacts dont les caractéristiques sont étroitement liées au contexte dans lequel elles ont été édifiées et, en particulier, aux savoirs et savoir-faire des bâtisseurs qui les ont conçues et réalisées. Dans ce chapitre, des considérations sont formulées à propos de l'influence exercée par les anciennes corporations d'artisans sur les groupes de bâtisseurs locaux ainsi qu'à l'égard du rôle du maître maçon au sein de ces derniers. Cet approfondissement a été effectué afin de dégager les raisons plausibles des dissimilitudes constructives existant au sein de l'environnement bâti de la région autour du lac d'Ohrid.

5.1.1. INFLUENCE DES CORPORATIONS D'ARTISANS SUR LES BÂTISSEURS LOCAUX

En Macédoine, le recours à la pratique d'intégrer des éléments horizontaux en bois dans les maçonneries semble dater de plusieurs siècles. Toutefois, une grande partie des habitations composant l'environnement bâti actuel a été réalisée au cours du XIX^e siècle et dans la première moitié du XX^e (Sumanov 2003). À ce moment historique, nombreux étaient les agriculteurs reconvertis dans le secteur de la construction qui se sont constitués en des corporations travaillant dans le territoire des Balkans, aujourd'hui partagé entre la Serbie, la Roumanie et la Bulgarie (Namichev 2005, 2007).



Fig.151 Bâtiment datant du XIX^e siècle (Janche).

Les membres d'une corporation étaient dans la plupart des cas originaires du même village ou d'un groupe ethnique particulier, ou alors ils appartenaient à la même famille. L'organisation de maçons et d'artisans en des corporations très structurées remonte à l'époque byzantine (Kizis 1977), quand plusieurs d'entre elles œuvraient dans des vastes régions s'étendant de l'Ouest de la Macédoine jusqu'aux confins de l'Asie Mineure, en passant par Constantinople (Moutsopoulos 1971; Brezovski 1993).

Connues sous l'appellation *isnaf des koudarei*, ces corporations furent actives pendant toute la domination ottomane (Ibid.) et elles ont joué un rôle considérable dans l'influence réciproque entre plusieurs communautés ethniques et entre les différentes cultures constructives (Namichev 2007). Les migrations saisonnières (du mois d'avril jusqu'à novembre) amenaient, inévitablement et constamment, les bâtisseurs à se confronter avec d'autres pratiques architecturales, possibles sources d'inspiration²¹⁸ (Kizis 1977).

Généralement, les corporations étaient composées par des maîtres artisans (de 2 à 10) et des ouvriers spécialistes de la terre crue (de 1 à 4). Toutefois certaines d'entre elles comprenaient davantage de membres et de compétences (Namichev 2005). Elles pouvaient en effet être constituées par des représentants de plusieurs corps de métier, notamment des maçons, des tailleurs de pierre, des plâtriers, des charpentiers, ou encore, des peintres (Kizis 1977). Ces groupes gardaient jalousement leurs savoirs et savoir-faire. Des appellations particulières et des termes codés étaient adoptés afin de maintenir le secret sur les astuces constructives qu'ils mettaient en œuvre (Moutsopoulos 1971). Par exemple, dans la région macédonienne de Krushie Prepa, les insertions horizontales en bois étaient indiquées avec le terme *pojasi*, signifiant « ceinture » (Namichev 2005, trad. M.H.), dénomination qui, de fait, explicite leur fonction de liaison des murs.

²¹⁸ En effet, dans le passé comme aujourd'hui, « le choc des différences culturelles peut élargir les points de vue et inspirer des changements créatifs » (McDonough & Braungart 2012, p.184).

Dans la région autour du lac d'Ohrid, en particulier dans sa partie septentrionale, les corporations de maçons de la communauté des *Miyaks* ont eu une forte incidence sur l'évolution des types d'habitat et des pratiques constructives caractérisant l'environnement bâti encore existant aujourd'hui (Sherdenkovska 2011). Pendant deux siècles, du XVIII^e au XIX^e, ces corporations avaient l'habitude de travailler dans différentes régions des Balkans du Sud et en Asie Mineure, soit quasiment sur tout le territoire sous la domination de l'Empire ottoman (Ibid.). Leur activité a été particulièrement prolifique vers la fin du XVIII^e siècle (Brezovski 1993) et leur service était très demandé surtout pour la réalisation d'édifices publics, d'églises et de demeures de familles aisées (Namicev 2005).

Les bâtiments des corporations les plus notoires et réputées représentaient une référence pour les groupes de bâtisseurs locaux travaillant à une échelle plus réduite, le plus souvent dans le village où ils habitaient et dans les alentours. Ces ouvrages exerçaient, ainsi, une influence directe sur ceux qui auraient réalisé la majorité des habitations, aujourd'hui éparpillées dans les zones rurales (Ibid.; Sherdenkovska 2011). La propagation des procédés constructifs adoptés par les corporations ne découlait pourtant pas uniquement des migrations et des tentatives d'imitation mais, parfois, elle était la conséquence d'initiatives institutionnelles visant au « transfert de technologie » par le biais de formations destinées aux groupes de bâtisseurs locaux²¹⁹.



Fig.152 Ouvrages réalisés par des groupes de bâtisseurs connus pour leurs compétences et leur habileté constructive, ayant travaillé dans plusieurs régions des Balkans : a) Habitation datant d'environ 300 ans et récemment restaurée (Galitchnik) ; b) Habitation édifiée en 1890 (Vevçani).

À la différence des grandes corporations travaillant dans des territoires très vastes et dont les ouvrages représentaient de véritables références architecturales (Kizis 1977), les groupes de bâtisseurs locaux ne visaient pas forcément à des réalisations originales au point de vue stylistique. Leur « mission » était d'abord de satisfaire les exigences et les aspirations des habitants, même des plus démunis, et cela tout en considérant les contraintes environnementales du lieu (Namicev 2005).



Fig.153 Ouvrages réalisés par des groupes de bâtisseurs travaillant à l'échelle locale : a) Habitation en moellons datant de 1965 (Zlesti) ; b) Habitation en briques de terre crue édifiée dans la deuxième moitié du XX^e siècle (Struga).

219 Communication personnelle avec l'architecte Melania Sherdenkovska.

Si nombreuses sont les similitudes entre les ouvrages des grandes corporations et ceux réalisés par les bâtisseurs locaux, spécialement en ce qui concerne les configurations spatiales et les procédés constructifs adoptés, une grande diversité peut en revanche subsister au niveau de leur qualité d'exécution (fig.154,155).



Fig.154 Détails de bâtiments réalisés par des corporations renommées : a) Chapiteau du poteau (Vevçani) ; b) Intersection de murs perpendiculaires (Vevçani) ; c) Maçonnerie en pierres de taille (Galitchnik).

Fig.155 Détails de bâtiments réalisés par les bâtisseurs locaux : a) Chapiteau du poteau (Velmej) ; b) Intersection de murs perpendiculaires (Ohrid) ; c) Maçonnerie en moellons (Zlesti).

5.1.2. RÔLE DU MAÎTRE MAÇON AU SEIN DES GROUPES DE BÂTISSEURS LOCAUX

Le niveau de qualité des architectures vernaculaires composant l'environnement bâti existant aurait apparemment dépendu de l'expérience des bâtisseurs mandatés par les propriétaires, et notamment de celle des maîtres maçons qui assumaient le rôle de contremaître pendant le chantier. Acquérant ce titre après une expérience professionnelle d'au moins 3-4 ans en tant qu'artisan maçon, celui-ci était le vrai concepteur en charge des principales décisions tant au niveau des principes structurels de base que des détails constructifs (Namichev 2005). Le bon déroulement du chantier était sous sa responsabilité : il devait donc posséder non seulement des connaissances sur le comportement des structures et les propriétés des matériaux mais également des compétences lui permettant de coordonner le travail entre tous les corps de métier impliqués. Certaines tâches étaient, en fait, effectuées par des spécialistes, détenteurs de savoirs et savoir-faire bien spécifiques²²⁰. Si l'argent à disposition le permettait, les murs en moellons étaient ainsi dressés par les meilleurs maçons et les pierres d'angles étaient mises en œuvre par les marbriers (Moutsopoulos 1971). La présence de certains dispositifs constructifs, ainsi que la diversité de la qualité de leur exécution, doivent être rapportées au niveau d'implication de ces différents spécialistes.

²²⁰ Les propriétaires participaient également au chantier pour baisser les coûts globaux et pour accélérer l'avancement des travaux ; ils contribuaient notamment à la fabrication de briques de terre crue (Namichev 2005).

Le maître maçon avait une responsabilité première également dans le processus de conception. Avant le début du chantier, il s'accordait avec le propriétaire au regard des dimensions du bâtiment, de la disposition des chambres, du nombre des ouvertures ainsi que des éventuels motifs décoratifs (Namicev 2005). À partir de ces indications, il dessinait le seul plan qui lui était nécessaire pour la réalisation : celui à échelle réelle tracé directement sur le sol. Le défi du maître maçon était d'accommoder les besoins et les volontés des propriétaires avec les possibilités et les limites propres aux procédés constructifs connus et aux matériaux à disposition. En fait, son apport serait aujourd'hui à chercher surtout dans l'élaboration de solutions architecturales témoignant d'un compromis entre choix fonctionnels et esthétiques ainsi qu'entre ceux-ci et les mesures constructives garantes de la stabilité des ouvrages.

Par exemple, dans le village de Vevçani (Macédoine), l'apparente volonté de la part des propriétaires de posséder des maisons avec les façades sur rue entièrement en maçonnerie aurait conduit les bâtisseurs à cacher les insertions horizontales en bois, en les intégrant dans la section du mur, ou à les utiliser uniquement pour les murs latéraux (fig.156). Ces choix constructifs ont donné lieu à des architectures qui se différencient de celles des sites avoisinants et qui, encore aujourd'hui, constituent une singularité dans l'environnement bâti vernaculaire de la région.



Fig.156 Façades sans insertions horizontales apparentes (Vevçani) : a,b) Insertions vraisemblablement dissimulées à l'intérieur du mur ; c,d) Insertions vraisemblablement mises en place uniquement dans les murs latéraux.

L'attention du maître maçon envers les ouvrages existants, et les pratiques constructives qui y étaient associées, était généralement élevée en raison des avantages que leur observation et leur prise en compte pouvaient présenter (Namicev 2007). Un processus d'apprentissage par l'examen du comportement structural du bâti aurait de fait constitué un outil fondamental, lui permettant de cerner et réinterpréter les dispositions et dispositifs constructifs efficaces par rapport au contexte d'intervention (climat, environnement naturel, etc.). Repérer les aspects de la culture constructive locale et des modèles constructifs de référence qui valait la peine de reproduire était donc une de ses principales tâches. Pour éviter de répéter les défauts présents dans les ouvrages existants, le maître maçon devait posséder une très grande habilité à « lire » l'architecture ainsi qu'une capacité à remédier aux faiblesses et aux problèmes constatés.

Les résultats de cet « exercice » entrepris par les maîtres maçons peuvent être aujourd'hui appréciés en se référant aux plusieurs variantes constructives qui caractérisent l'environnement bâti actuel ; de fait, leur niveau d'adaptation au risque sismique est hétérogène. Ces différentes variantes sont commentées dans les deux chapitres qui suivent, en mettant en évidence les facteurs spécifiques à la base de leur bonne ou mauvaise performance en cas de tremblement de terre.

5.2. DÉGÂTS SISMIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT BÂTI

Bien que les bâtiments vernaculaires examinés présentent de nombreuses similitudes, ils se distinguent par des particularités structurelles augmentant leur niveau de vulnérabilité. Celles-ci sont exposées, ci-dessous, en référence aux dégâts sismiques subis, lors de deux séismes de puissance modérée (M 4.4 et M 4.5), par les ouvrages dont le système porteur vertical est constitué de maçonneries en moellons hourdées du type double mur²²¹.

5.2.1. DÉGÂTS DANS LE SYSTÈME PORTEUR VERTICAL

Les dégâts ayant affecté le système porteur vertical diffèrent entre eux selon qu'on considère les parties inférieures ou supérieures des bâtiments. Cette distinction résulte de la nature diverse des efforts principaux auxquels ces parties sont soumises lors d'un événement sismique : tranchants dans les portions du mur proches du sol ; de flexion dans celles au sommet de l'ouvrage.

Dans les parties inférieures, un relâchement des assemblages d'angle entre les insertions en bois a été constaté, pouvant conduire à leur déconnexion (fig.157a,b). Ceci s'est produit, mais beaucoup plus rarement, également en correspondance des raccordements entre les tasseaux longitudinaux (fig.157c,d). Dans ce cas de figure, la déconnexion expose le mur à une fissuration verticale qui se prolonge dans les deux segments horizontaux de la maçonnerie se trouvant au-dessus et au-dessous de l'insertion endommagée.

Le relâchement des assemblages découle d'une faible capacité des joints (à mi-bois et en biseau) à résister à la traction, notamment en raison de leur dégradation physique due à l'action de l'eau ayant très souvent conduit à la rouille des clous et au pourrissement du bois.

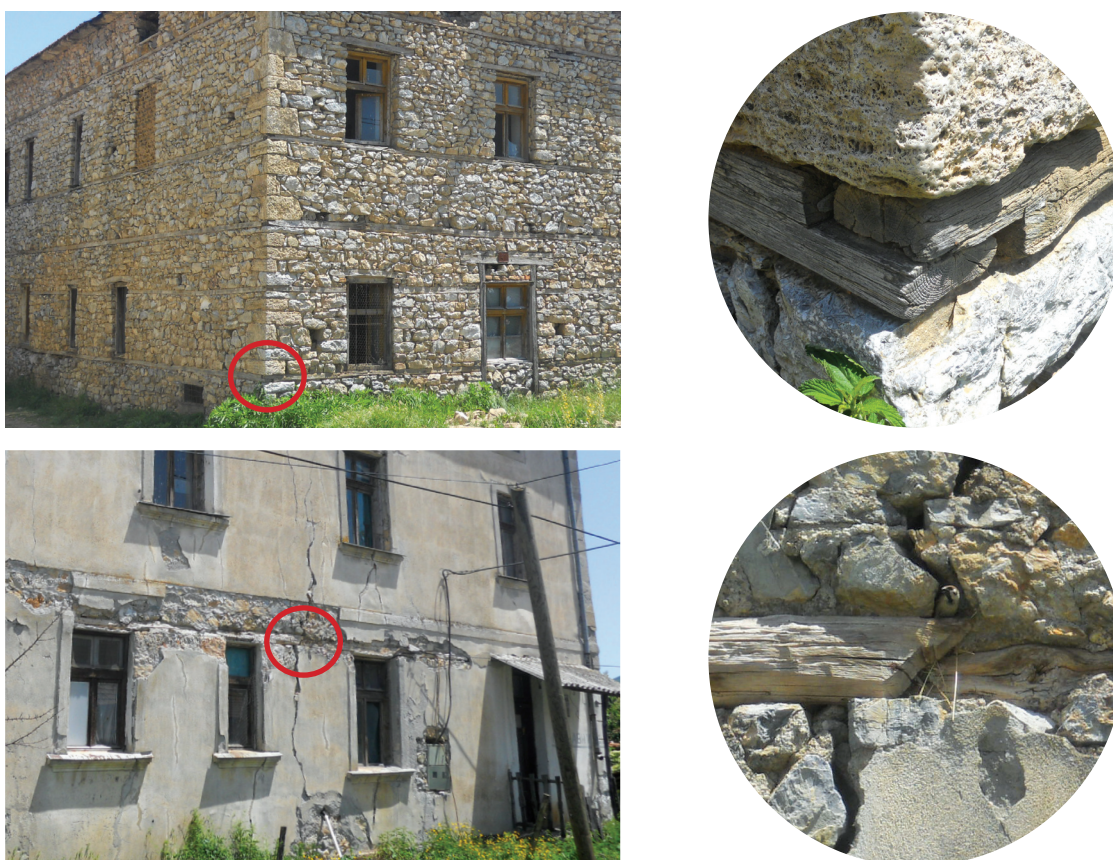


Fig.157 Relâchement de l'assemblage d'angle (a,b) et du raccordement longitudinal entre les tasseaux (c,d).

²²¹ Dans les bâtiments considérés, les moellons ont été généralement maçonnes avec un mortier à la chaux ; dans des cas plus rares, avec un mortier de terre.

Dans les parties supérieures des bâtiments, une fissuration verticale a été observée à l'intersection de murs perpendiculaires (fig.159a). Celle-ci est à l'origine de leur séparation partielle qui induit la déformation des murs et l'inclinaison des façades, pouvant même générer la chute de pierres (fig.159b,c). Toutefois, aucune séparation totale ayant provoqué le renversement des murs n'a été observée. En fait, la présence des insertions horizontales empêche qu'un tel mode de rupture se produise, car elles permettent de compenser l'affaiblissement de la liaison entre les segments orthogonaux de la maçonnerie.

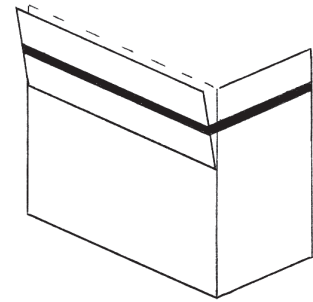


Fig.158 Schéma : séparation partielle des murs perpendiculaires.



Fig.159 Fissuration verticale au sommet du bâtiment (a) avec successive inclinaison de la façade (b) et chute de pierres (c).

Un autre type de dégât identifié dans les portions supérieures des murs correspond au renversement des pierres de la couche extérieure de la maçonnerie (fig.161). La cause première de cette réaction est à chercher dans la faible cohésion transversale du mur résultant d'une perte d'efficacité du mortier, due à sa détérioration.

Dans tous les bâtiments présentant ce type de dommage, seul le segment horizontal du mur se situant juste au-dessous de la toiture a été affecté (fig.161a,b). Cela signifie que le renversement des pierres ne concerne généralement qu'une portion de la maçonnerie de hauteur limitée, mesurant généralement moins de 1 mètre. En fait, le seul ouvrage où ceci s'est produit dans une portion du mur plus importante résulte de la suppression des insertions horizontales, à l'occasion d'une intervention postérieure à son édification (fig.161c).

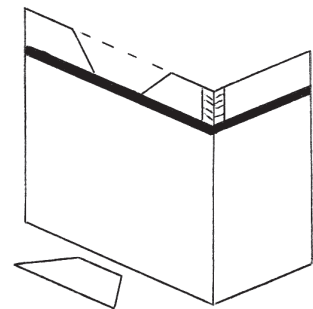


Fig.160 Schéma : renversement des pierres de la couche extérieure de la maçonnerie.

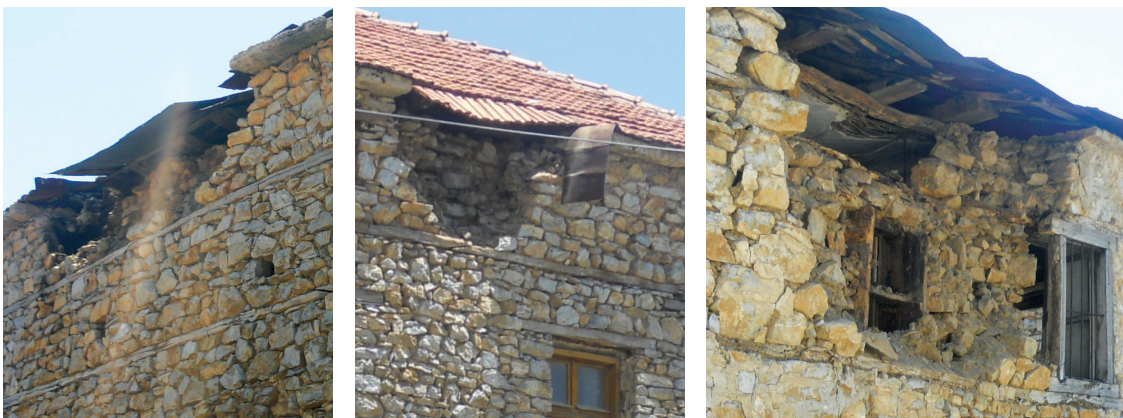


Fig.161 Renversement des pierres uniquement dans le segment horizontal de la maçonnerie situé au-dessous de la toiture (a,b) ou dans une portion du mur plus importante (c).

Par rapport à ces deux types de dégâts sismiques caractérisant les parties supérieures, on a pu constater que la séparation partielle de deux murs perpendiculaires et le renversement de la maçonnerie ne représentent pas des dommages qui sont forcément corrélés. En effet, la chute de portions de mur, en particulier de celles situées dans la partie centrale des façades, a lieu uniquement en présence de la combinaison de deux facteurs spécifiques : la bonne liaison d'angle entre les maçonneries et une faible cohésion transversale du mur.

Le troisième type de dégât qui a eu lieu dans les portions supérieures des ouvrages coïncide avec la déconnexion entre la charpente du toit et l'un des murs extérieurs porteurs (fig.163). Cette disjonction provoque une forte inclinaison de la maçonnerie en raison d'un manque d'ancrage au sommet ; sa stabilité est ainsi garantie uniquement par la liaison avec les deux murs extérieurs qui lui sont perpendiculaires et ceux de refend, si présents.

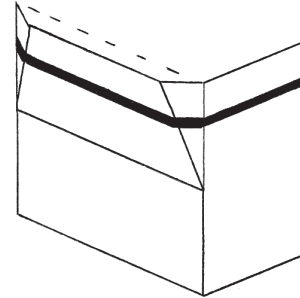


Fig.162 Schéma : déconnexion entre la toiture et un mur extérieur.



Fig.163 : Déconnexion entre le mur et la charpente : vues depuis l'intérieur (a) et l'extérieur (b) du même bâtiment.

Ces trois types de dégâts ont été observés exclusivement dans les bâtiments qui ne possèdent pas des insertions horizontales en bois au niveau de la toiture. Dans ces cas, les fermes de la charpente s'appuient directement sur la tête du mur et, sur la couche extérieure de la maçonnerie, les bâtisseurs ont disposé une corniche constituée de pierres plates (fig.164a,b,c). Apparemment, cette variante constructive rend les structures en maçonnerie plus vulnérables face aux sollicitations sismiques. En fait, les fissurations verticales à l'intersection de murs orthogonaux ainsi que les fissures visibles dans les portions supérieures des façades se sont toujours développées en concomitance avec l'écartement des pierres composant ce type de corniche (fig.164d). Cette variante a été identifiée presque exclusivement dans les deux villages dans lesquels s'est déroulée l'analyse des dégâts (Velmey et Beltchichta) ; à ces endroits, elle est assez répandue au sein de l'environnement bâti, néanmoins, des constructions avec des insertions horizontales en bois également au niveau du toit sont aussi présentes.

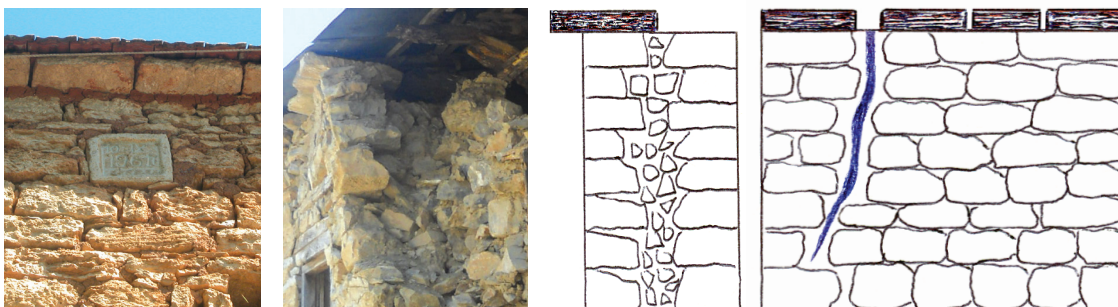


Fig.164 Variante de la corniche du toit : Pierres plates juxtaposées (a) et reposant sur la couche extérieure du mur (b) ; Schémas de la section du mur (c) et de son élévation montrant la fissuration verticale favorisée par l'écartement des pierres de la corniche (d).

5.2.2. DÉGÂTS SUR LES ENDUITS

Nombreux sont les bâtiments qui présentent des enduits extérieurs et intérieurs en ciment ou à la chaux. Dans ces cas, la reconnaissance des dégâts sur le système porteur vertical se complexifie en raison de l'impossibilité d'examiner de manière détaillée les effets sismiques sur la maçonnerie ainsi que sur les insertions horizontales en bois. Par ailleurs, c'est très vraisemblablement aussi pour cette raison que l'emploi d'enduit n'étaient traditionnellement pas très courant ; une meilleure lisibilité des pathologies aurait, en fait, permis une meilleure compréhension des facteurs critiques propres aux procédés constructifs adoptés et, donc, des aspects qu'il aurait fallu perfectionner. Des remarques peuvent toutefois être formulées sur la gravité des dommages subis ; cela à partir de l'interprétation des types de fissures visibles dans les enduits et de leur emplacement dans l'ensemble bâti.

Dans l'enduit extérieur, les fissures se sont produites dans les sens horizontal en correspondance des insertions (fig.165). Très probablement, des mouvements ont eu lieu dans le mortier placé au-dessus des éléments en bois, ce qui aurait d'ailleurs permis de dissiper une partie de l'énergie sismique.

Des fissures en biais étaient également visibles, mais exclusivement en correspondance des zones entre les insertions et les angles des ouvertures.

La combinaison de fissures horizontales et de celles en biais peut engendrer le détachement de grandes portions de l'enduit ; risque qui est particulièrement élevé avec des mortiers de ciment, en raison de leur faible adhésion sur les murs de pierre. Dans certains cas, il a pu être évité grâce à une maille métallique intégrée dans l'enduit, mise en place lors de l'application du mortier.



Fig.165 Fissures horizontales en correspondance des insertions avec successif détachement d'une portion de l'enduit en ciment (a) et fissures en biais aux angles des ouvertures (b) ; c) Schéma indiquant les zones de fissuration dans l'enduit extérieur.

Par rapport aux types de fissuration constatés, il est à noter que les murs comprenant des insertions horizontales n'ont pas présenté de fissures diagonales, contrairement aux maçonneries plus récentes qui en sont dépourvues (fig.166) ; ce qui témoigne de leur apport bénéfique dans le comportement de murs sollicités dans le plan.



Fig.166 Fissuration diagonale dans une maçonnerie en briques de ciment dépourvue d'insertions.

À l'intérieur des bâtiments, l'enduit des plafonds exhibait parfois des fissures capillaires de quelques millimètres de largeur qui, lorsqu'elles étaient étendues et diffuses, ont provoqué son détachement (fig.167a). Des fissures beaucoup plus larges, entre 1 et 3 cm, ont été observées entre les murs et les planchers ainsi qu'aux angles des pièces, à l'intersection de murs orthogonaux extérieurs (fig.167b). Ces fissures indiquent que des mouvements particulièrement violents se sont produits. Si celles horizontales entre le mur et le plancher ne témoignent généralement pas de désordres structuraux majeurs, celles verticales entre deux murs perpendiculaires peuvent, en revanche, indiquer qu'un mécanisme de disjonction des maçonneries s'est activé, en particulier, si la largeur de la fissuration s'accroît de manière progressive du bas vers le haut (fig.167c).



Fig.167 Détachement de l'enduit du plafond (a) et fissures à l'intersection de murs ainsi que entre ces derniers et le plancher (b) ; c) Schéma des mouvements probables de deux murs perpendiculaires à l'origine de la fissure verticale dont la dimension augmente vers le haut.

5.2.3. AUTRES TYPES DE DÉGÂTS SISMIQUES

En plus des dégâts observés dans les systèmes porteurs verticaux et dans les enduits, le bâti examiné a subi deux autres types de dommages. Nombreuses sont les cheminées qui se sont effondrées, parfois provoquant des dégâts aux toitures en tuiles. En outre, dans le cas où de nouvelles parties en béton armé ou en maçonnerie de brique ont été adossées aux architectures vernaculaires, une très large fissure verticale (environ 4 cm) était visible en correspondance de la connexion (fig.168b) ; leur comportement dynamique divergeant ainsi qu'un mouvement différencié ont induit leur entrechoc, soit l'effet de martèlement.

À la différence des dégâts présentés auparavant, ceux-ci ne sont pas propres au procédé constructif considéré dans ce chapitre ; ils ont été constatés indistinctement du type de structure, même dans les ouvrages plus récents.



Fig.168 Autres types de dégâts : a) Effondrement de la cheminée ; b) Fissuration verticale entre le bâtiment original (à gauche) et la partie annexée (à droite).

5.2.4. NIVEAU D'ENDOMMAGEMENT DE L'ENVIRONNEMENT BÂTI

Les constructions analysées lors de cette investigation *in situ* peuvent être classées selon leur niveau d'endommagement.

Ci-après, la gravité des dommages subis est combinée avec leur étendue dans l'environnement bâti, afin d'avoir une vision d'ensemble des effets des deux séismes considérés sur les architectures correspondant au type de structure examiné. Pour ce faire, on utilise les cinq degrés de dégâts définis dans l'échelle macrosismique européenne EMS-98 (Grünthal et al. 2001) et qui sont couramment employés pour déterminer l'intensité sismique d'un tremblement de terre :

- Degré 1 : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)
60 % du bâti n'a subi aucun dégât structural :
 - fissuration capillaire de l'enduit ;
 - fissuration horizontale de l'enduit en correspondance des insertions ;
 - détachement de portions d'enduit.

- Degré 2 : Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)
25 % du bâti a subi des dégâts structuraux légers :
 - fissuration verticale dans l'enduit intérieur à l'intersection de murs perpendiculaires ;
 - relâchement des assemblages entre les insertions horizontales en bois.

- Degré 3 : Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)
10 % du bâti a subi des dégâts structuraux modérés :
 - renversement de la couche extérieure de la maçonnerie.

- Degré 4 : Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)
5 % du bâti a subi des dégâts structuraux importants :
 - séparation partielle de murs orthogonaux ;
 - inclinaison et/ou déformation des murs, avec renversement de portions de la maçonnerie ;
 - déconnexion entre les murs porteurs et la charpente de la toiture.

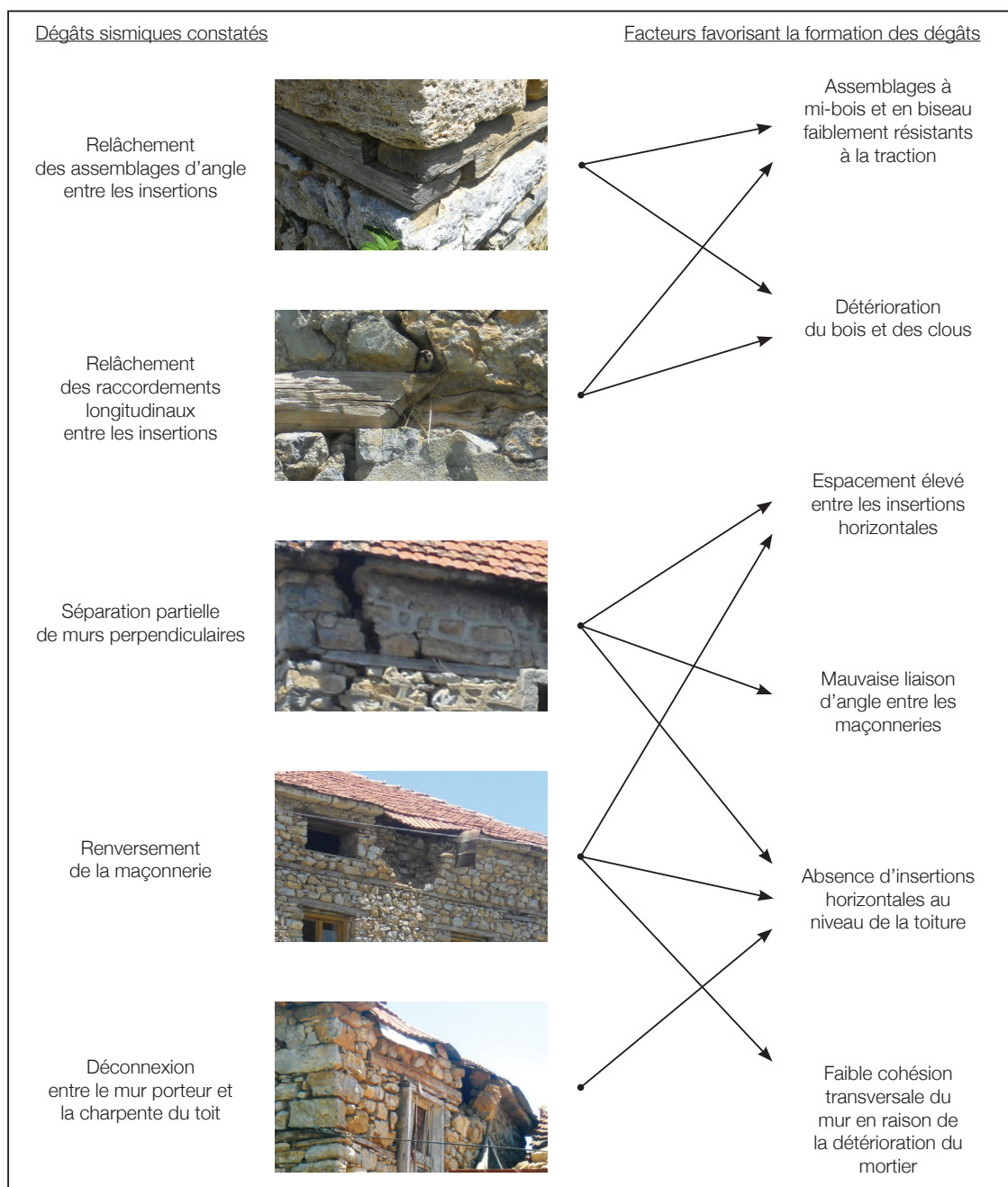
- Degré 5 : Destruction (dégâts structuraux très importants)
0 % du bâti a subi des dégâts structuraux très importants ayant entraîné l'effondrement partiel ou total des ouvrages.

L'ensemble de ces données d'ordre qualitatif (types de dommages) et d'ordre quantitatif (étendue des dommages) indique que les bâtiments examinés peuvent être regroupés dans quatre des cinq degrés de dégâts. Cette classification met en évidence la variabilité considérable du niveau d'endommagement des structures. Elle souligne dans quelle mesure des variations dans la mise en œuvre du procédé constructif (p.e. l'absence des insertions horizontales en bois au niveau de la toiture), des interventions récentes (comme la suppression des insertions existantes) ou encore la détérioration de parties structurelles (due à l'altération des matériaux) peuvent influencer de manière importante sur la performance des bâtiments, même lors d'événements sismiques d'une puissance modérée.

D'autre part, la gravité des dommages subis par certaines constructions rend explicite les répercussions de tremblements de terre modérés dans l'affaiblissement de la résistance globale d'un environnement bâti, sur le long terme. Si des activités de réparation ne sont pas systématiquement entreprises, la stabilité de chaque ouvrage sera davantage compromise en raison de l'effet cumulatif des dégâts.

5.2.5. DÉGÂTS SISMIQUES ET PRÉVENTION

À partir de l'analyse d'un environnement bâti affecté par un événement sismique, les types de dégâts auxquels les constructions sont exposées peuvent être repérés, de même que les facteurs qui en sont à l'origine (tab.25). Leur reconnaissance favorise l'identification des caractéristiques de l'architecture locale qui sont susceptibles de réduire sa résistance. Ainsi, leur investigation constitue une activité indispensable pour la conception d'activités de prévention du risque, notamment pour la consolidation sismique. La prise de décision relative aux interventions prioritaires à effectuer peut, en effet, être facilitée si l'on peut compter sur un répertoire des faiblesses potentielles et des facteurs critiques propres à chaque procédé constructif vernaculaire. Les interventions peuvent alors viser à contrer localement les aspects les plus urgents, comme par exemple atténuer les modes de rupture déjà activés et/ou prévenir les mécanismes de rupture probables. Compte tenu de la difficulté technique et/ou financière de parvenir systématiquement à un « risque zéro », la possibilité d'entreprendre des interventions efficaces de manière ponctuelle et ciblée représente un aspect décisif en vue d'optimiser les efforts ainsi que les ressources disponibles.



Tab.25 Dégâts sismiques constatés et facteurs favorisant leur formation : associations hypothétiques.

CONSOLIDATION SISMIQUE

En relation au contexte examiné dans le cadre de cette étude de cas, certaines considérations peuvent être formulées, à titre d'exemple, par rapport aux possibles travaux de consolidation sismique.

Dans certains ouvrages, il est prioritaire de renouveler les éléments constructifs ne garantissant plus leur fonction structurelle, notamment les insertions horizontales en bois qui se sont détériorées et les portions de maçonneries qui se sont désolidarisées. L'introduction de nouveaux éléments en bois pouvant assurer la bonne liaison entre les murs orthogonaux, en particulier au niveau de la toiture, s'avère parfois également nécessaire.

Dans d'autres cas, il peut être plus pertinent et viable de remédier aux défauts en intégrant dans l'ensemble bâti des « anticorps » permettant de combattre les formes de vulnérabilité reconnues (Doglioni & Angeletti 1994). Par exemple, des éléments supplémentaires tels que des plaques ou des feuilletts métalliques peuvent être employés afin de renforcer les assemblages d'angles et les raccords entre les tasseaux longitudinaux qui se sont relâchés, notamment ceux situés près du sol où les contraintes dues aux accélérations sismiques sont particulièrement élevées. Ou encore, pour compenser la faible cohésion transversale de la maçonnerie, des injections de mortier de jointoiement peuvent être effectuées pour remplir les vides présents dans le mur surtout dans les parties supérieures des bâtiments, plus exposées au risque de renversement²²² (Pankaj & Thakkar 2003; ElGawady et al. 2004).

Lorsque les travaux de consolidation sismique ne peuvent pas être réalisés avec les mêmes matériaux mis en œuvre par les bâtisseurs vernaculaires, car la matière première n'est plus disponible et/ou le prix de la main d'œuvre nécessaire est prohibitif, des techniques développées plus récemment peuvent être également adoptées (Jodidio 2011). Dans ce cas, le comportement structural du bâtiment réhabilité doit être évalué en prévoyant les effets des interventions, afin de vérifier que la logique constructive ne soit pas bouleversée (Rovero & Tonietti 2012).

Par exemple, pour compenser l'absence des insertions horizontales en bois au niveau de la toiture (à l'origine de la séparation partielle des murs perpendiculaires), l'intégration de chaînages en béton armé ne semble pas représenter une solution techniquement pertinente. Bien que ceux-ci assument plus ou moins les mêmes rôles structurels des insertions en bois en forme d'échelle (Coburn & Spence 1987a), le poids propre différent et la rigidité des éléments en béton armé impliqueraient une modification excessive du comportement sismique de l'ouvrage²²³. En revanche, l'éventualité d'appliquer des lamelles légères en polymère renforcé de fibres (p.e. en carbon) pourrait, par exemple, être considérée en raison de leur efficacité à relier les murs (Triantafillou & Fardis 1997) et à limiter les déformations excessives de la maçonnerie, en assumant de fait le rôle de confinement horizontal (Mazzolani 2012).

²²² Un mortier à la chaux est généralement employé pour les maçonneries en moellons alors que pour celles en briques de terre crue c'est un mortier de terre qui est injecté (Oliveira et al. 2006).

²²³ La pratique consistant à remplacer les planchers en bois du bâti ancien en maçonnerie avec des dalles et des chaînages en béton armé était très répandue en Italie, car suggérée par les directives institutionnelles en matière de protection sismique. Aujourd'hui, elle est toutefois proscrite car, lors de séismes récents, il a été constaté qu'elle n'améliorait guère la résistance du bâti, au contraire, elle en augmentait souvent la vulnérabilité (Bento et al. 2005; Ferrigni et al. 2005; Dazio et al. 2009).

5.3. SOLUTIONS CONSTRUCTIVES PARASISMQUES

Sur la base de l'analyse des dégâts sismiques subis par le bâti, il a été possible de reconnaître les solutions constructives présentes dans les sites affectés et/ou limitrophes qui permettent d'empêcher et/ou retarder l'évolution des mécanismes de rupture constatés. Ci-après, ces variantes sont exposées en les rapportant aux cinq paramètres identifiés comme déterminant l'efficacité sismique du procédé constructif (cf. partie III, chap. 2.1.) : la dimension des tasseaux de bois ; la liaison d'angle des insertions ; leur cohésion transversale ; leur raccordement longitudinal ; leur emplacement dans le plan vertical.

5.3.1. DIMENSION DES TASSEAUX DE BOIS

La dimension des tasseaux de bois composant les insertions horizontales ne varie pas beaucoup d'un bâtiment à l'autre. De section rectangulaire, leur largeur mesure 12 cm et leur hauteur environ 8 cm ; de ce fait, ils sont suffisamment épais pour être considérés comme des éléments rigides pouvant assumer le rôle de linteau. La rigidité des tasseaux longitudinaux permet, en fait, de soutenir la couche verticale de la maçonnerie qui se trouve au-dessus, ce qui évite l'effondrement du mur même en cas d'écroulement d'autres couches du même segment horizontal et/ou en cas de dislocations dans celui sous-jacent. Cette capacité à maintenir en place la maçonnerie est particulièrement importante notamment dans les murs en briques de terre crue qui, très sensibles à l'action de l'eau, peuvent facilement s'éroder. Le rapport entre la largeur et la hauteur des tasseaux de bois (3 : 2) garantit également une bonne résistance en flexion dans leur plan horizontal (Schacher & Ali 2009).

Les propriétés des insertions permettent ainsi de compenser et neutraliser de manière efficace les problèmes liés à un mouvement hors plan excessif - visible dans l'inclinaison des façades -, mais de même ceux pouvant résulter du déplacement de la maçonnerie dans le sens latéral - visible dans l'obliquité des montants composant le cadre des ouvertures - et dans le sens vertical - visible dans la courbure des tasseaux longitudinaux (fig.169).

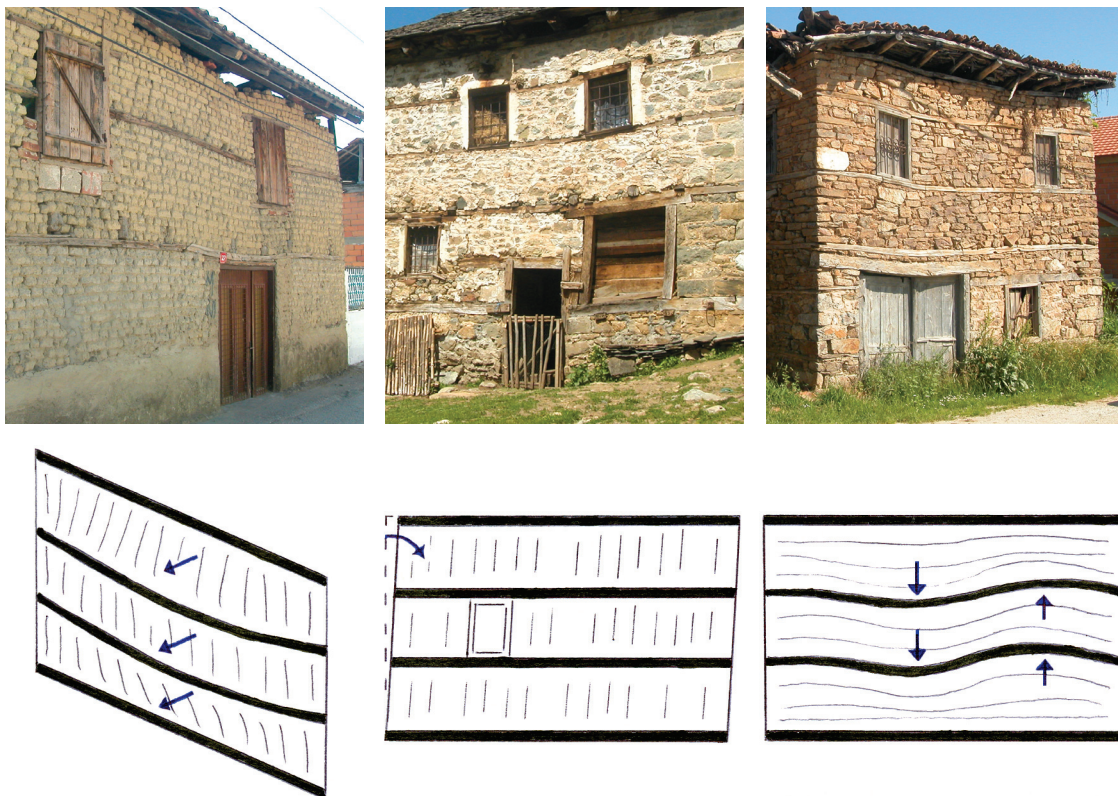


Fig.169 Efficacité des insertions horizontales à compenser les mouvements de la maçonnerie : a) Hors plan (Struga) ; b) Dans le sens latéral (Malovichté) ; c) Dans le sens vertical (Izbiste) ; d,e,f) Schémas indiquant l'orientation des mouvements du mur compensés par l'action des insertions.

5.3.2. LIAISON D'ANGLE DES INSERTIONS

La tenue de la liaison entre les insertions horizontales de murs orthogonaux dépend généralement de la résistance des clous ; en effet, dans la plupart des cas ce sont des joints à mi-bois cloués qui ont été réalisés. Parfois, les tasseaux longitudinaux ont été fixés à une planche en bois sous-jacente pour apporter un élément de connexion supplémentaire.

Néanmoins, on a repéré deux autres types d'assemblages capables de neutraliser des éventuels problèmes dérivant d'une perte d'efficacité des clous, ceci grâce à une conformation particulière du joint qui améliore sa résistance à la traction. Le risque de séparation des murs perpendiculaires en raison d'une déconnexion des insertions est ainsi fortement réduit ; risque qui est d'ailleurs souvent davantage diminué par la présence de chaînes d'angle en pierre de taille.

Le premier type correspond à un assemblage à queue d'aronde, où les tasseaux de bois ne peuvent pas se déconnecter en raison de la forme trapézoïdale de leurs extrémités (fig.170a,b,c). Le deuxième type d'assemblage avec une tenue accrue se caractérise par un joint à tenon et mortaise qui permet l'encastrement des tasseaux (fig.170d).

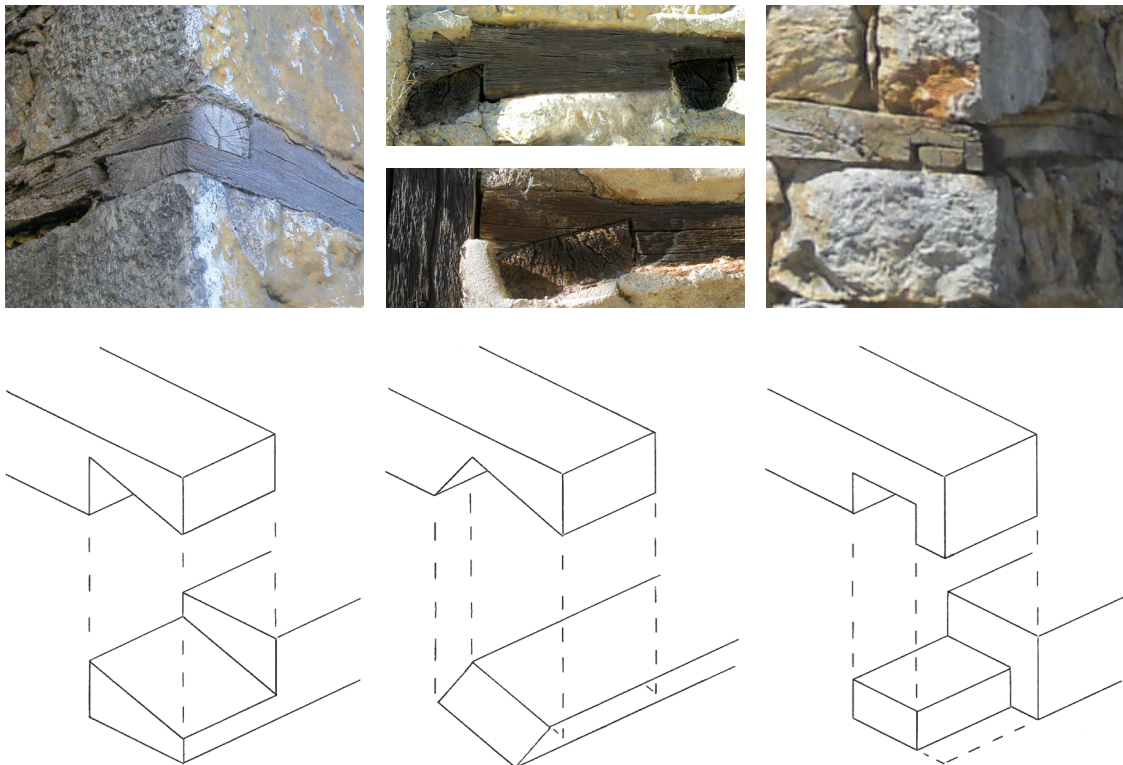


Fig.170 Liaisons d'angle spéciales : Assemblage à queue d'aronde (a, Struga) et variantes avec le tasseau inférieur incliné (b,c, Ohrid) ; d) Joint à tenon et mortaise (Belchichta) ; e, f, g) Schémas : Axonométries des trois types d'assemblages identifiés.

Les insertions horizontales en bois non seulement se prolongent dans les murs extérieurs mais également dans les murs de refend, généralement disposés avec un espacement de 4 mètres (fig.171a). Leur continuité dans tous les murs composant le système porteur vertical va ainsi constituer un « réseau » en bois cohérent (fig.171b) assurant, lors d'un tremblement de terre, un comportement dynamique uniforme de l'ensemble bâti. La forte interaction entre les murs porteurs peut, de fait, amener à considérer la réponse sismique de ces structures comme suivant un comportement d'ensemble²²⁴. Ainsi, grâce à l'efficacité des insertions à transmettre les charges, les murs parallèles aux secousses soulagent ceux qui sont sollicités hors de leur plan, en réduisant le risque de renversement de ces derniers (Aytun 1981).

²²⁴ Par ailleurs, c'est ce caractère particulier qui distingue ce type de structures des ouvrages vernaculaires en maçonnerie ordinaire.

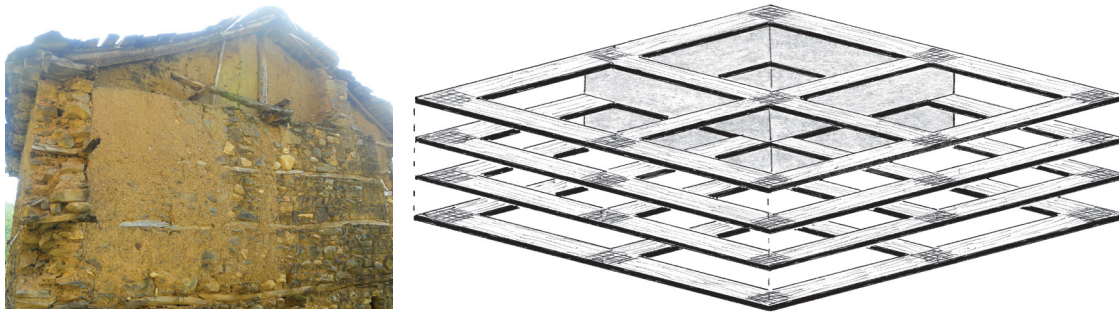


Fig.171 Continuité des insertions horizontales : a) Mur de refend (Janche) ; b) Schéma : « réseau » en bois cohérent reliant tous les murs porteurs d'un bâtiment.

5.3.3. COHÉSION TRANSVERSALE DES INSERTIONS

Dans les maçonneries en moellons (50-70 cm d'épaisseur), les traverses de bois qui connectent les tasseaux longitudinaux sont disposées avec un espacement qui est généralement équivalent ou inférieur à l'épaisseur du mur. Les traverses sont plus espacées dans le cas des maçonneries en briques de terre crue (40-60 cm d'épaisseur), elles sont placées avec un écartement pouvant mesurer jusqu'à 1 mètre.

La disposition régulière de traverses limite les mouvements des tasseaux longitudinaux, notamment leur déformation provenant de la dilatation du bois ainsi que leur flexion excessive dans le sens horizontal, pouvant être induite par les sollicitations sismiques. Elle réduit ainsi le risque d'une déstabilisation des unités maçonnées, susceptible d'entraîner la désagrégation du mur. Dans les maçonneries du type double mur (cas le plus répandu) la présence de traverses s'avère déterminante car elle compense l'absence généralisée de pierres en boutisses traversantes. Disposées au moins tous les 50 cm, elles évitent ainsi la délaminatation et la séparation totale des différentes couches verticales du mur, même en cas d'une perte de cohésion du blocage (fig.172c). Force est cependant de constater que l'efficacité des traverses dépend essentiellement de la résistance des clous (outre que de l'état du bois) employés pour les fixer aux tasseaux longitudinaux ; en fait, aucun type d'assemblage spécial assurant une tenue accrue n'a été identifié.



Fig.172 Traverses de connexion : a) Dans une maçonnerie de pierre (Belchichta) ; b) Dans une maçonnerie en briques de terre crue (Tirana) ; c) Bâtiment en ruine dont les murs sont encore debout grâce à la présence de traverses connectant les deux couches de la maçonnerie (Malovichté).

5.3.4. RACCORDEMENT LONGITUDINAL DES INSERTIONS

Les raccords entre les tasseaux longitudinaux sont réalisés avec des joints à mi-bois ou en biseau cloués (fig.173) ; leur bonne tenue dépend exclusivement des clous et du type de bois mis en œuvre par les bâtisseurs. À ce propos, il est intéressant de constater que dans les bâtiments les plus anciens, les clous sont plus grands que dans les constructions plus récentes et leur résistance à la rouille semble supérieure. Le bois mis en œuvre semble aussi être plus résistant à l'attaque des insectes, des bactéries

et des champignons, donc moins assujetti à la décomposition. En fait, des espèces de bois moins chères ont été souvent employées pour les ouvrages récents, mais leur résistance à la pluie et aux attaques d'agents pathogènes s'est révélée être largement inférieure.



Fig.173 Raccordement entre les tasseaux longitudinaux : a) Liaison en biseau avec bois de bonne qualité (Vevçani) ; b) Assemblage en biseau avec bois pourri (Korçë) ; c) Joint à mi-bois avec clous rouillés (Ohrid).

5.3.5. EMPLACEMENT DES INSERTIONS DANS LE PLAN VERTICAL

De manière générale, les insertions en bois sont intégrées dans les murs avec un espacement vertical variant entre 50 et 150 cm. Dans les cas où celui-ci est supérieur, la maçonnerie présente très souvent une fissuration due, vraisemblablement, à des secousses sismiques ou au tassement différentiel.

Ci-dessous, des remarques sont émises en référence à leur emplacement spécifique dans le plan vertical du mur.

Niveau du soubassement

Dans la plupart des sites analysés, l'insertion inférieure est couramment disposée à environ 1 mètre du niveau du sol (fig.174a,b). Toutefois, dans un site particulier (ville macédonienne de Struga), plusieurs constructions se caractérisent par des insertions placées beaucoup plus proches du terrain (fig.174c). Cette différence peut être rapportée au type de sol : ce site se trouve, en effet, sur une couche sédimentaire dans la plaine près du lac d'Ohrid, tandis que les autres cas étudiés se situent, dans une grande majorité, sur des affleurements rocheux. L'intégration d'éléments en bois au niveau du sol pourrait effectivement correspondre à une solution permettant, d'une part, de réduire les problèmes liés au tassement différentiel et, de l'autre, de limiter la portion de la maçonnerie exposée aux très amples oscillations qui se forment lors d'un tremblement de terre dans les terrains souples.



Fig.174 Constructions situées sur des types de sols différents : a, b) Sur sol rocheux (Vevçani, Lin) ; c) Sur sol souple (Struga).

Niveaux de l'appui des fenêtres et du linteau

Dans tous les bâtiments, les insertions sont disposées au niveau de l'appui des fenêtres. En revanche, au niveau du linteau, elles ne sont pas toujours présentes ; dans ces cas, un élément additionnel est fixé au-dessus du cadre de l'ouverture (fig.175b). Parfois, des insertions ont été également intégrées

entre les niveaux de l'appui et du linteau ; elles sont alors très souvent situées en correspondance des traverses d'imposte des fenêtres (fig.175c), ce qui permettrait de réduire le risque de rupture du montant du cadre lorsqu'il est soumis à des pressions exercées par les tasseaux longitudinaux.



Fig.175 Correspondance entre les insertions et les ouvertures : a) Tasseaux aux niveaux de l'appui et du linteau (Kicinica) ; b) Tasseaux au niveau de l'appui et élément en bois additionnel au niveau du linteau (Lin) ; c) Traverse d'imposte au même niveau de l'insertion (Belchichta).

Niveau du plancher

Au niveau du plancher, les solives primaires sont fixées aux tasseaux longitudinaux de l'insertion sous-jacente ; ce qui assure un bon ancrage entre le système porteur vertical et celui horizontal (fig.176a,c). En outre, les solives occupent toute l'épaisseur du mur, réduisant ainsi la probabilité d'une dislocation de leurs extrémités vers l'intérieur en cas de séisme, permettant, donc, de limiter le risque d'écroulement du plancher.

La liaison entre les solives et le mur est nettement améliorée en présence de jambes de force s'appuyant sur les insertions. Ces éléments sont disposés généralement à l'extérieur du bâtiment en correspondance de parties saillantes (fig.176d), mais, parfois, aussi à l'intérieur (fig.176e).

Dans certains bâtiments, l'impossibilité de connecter les solives primaires du plancher aux murs qui leur sont parallèles a été compensée par le prolongement des entretoises au-delà des solives de rive, garantissant, de fait, le bon ancrage de tous les quatre murs extérieurs (fig.176b).

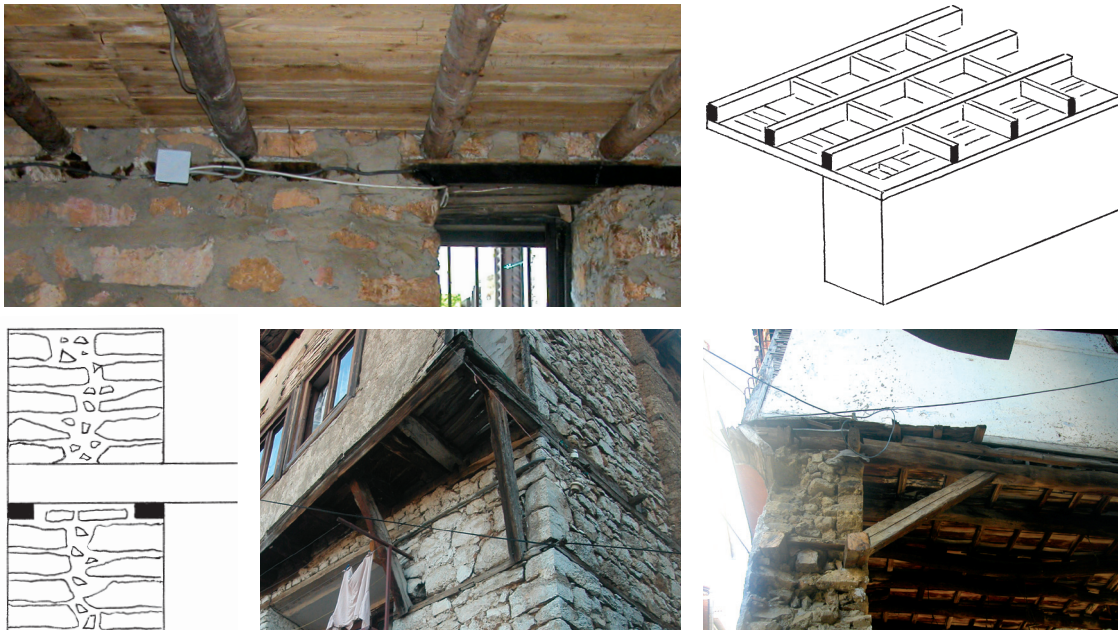


Fig.176 Liaison entre le mur porteur et le plancher : a) Solives fixées aux tasseaux de bois sous-jacents (Galitchnik) ; Schémas : Prolongement des entretoises au-delà des solives de rive (b) et section du mur au niveau du plancher (c) ; Jambes de force à l'extérieur (d, Ohrid) et à l'intérieur (e, Struga).

Niveau de la toiture

Au niveau de la toiture, une double insertion horizontale permet d'ancrer efficacement les entrails des fermes de la charpente aux murs extérieurs (fig.177a,b). De ce fait, le risque de déconnexion entre le système porteur vertical et celui horizontal est considérablement réduit.

En outre, le dernier segment horizontal de la maçonnerie situé au sommet du bâtiment, juste au-dessous du toit, possède très souvent une hauteur moindre que celle des autres segments composant le mur (fig.177c). Cet espacement limité entre les insertions, mesurant au maximum 60 cm, accroît la stabilité de la maçonnerie dans sa partie supérieure, endroit où le risque de renversement est particulièrement élevé en raison des forces d'inertie qui se génèrent lors d'un séisme.

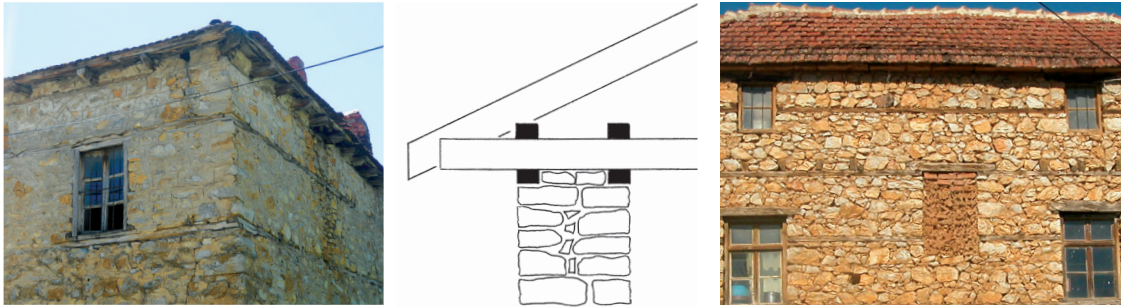


Fig.177 Mesures réduisant la vulnérabilité des parties supérieures des bâtiments : a) Entrails des fermes encastrés entre deux insertions (Belchichta) ; b) Schéma : section du mur au niveau de la toiture ; c) Hauteur réduite du segment de la maçonnerie situé juste au-dessous de la toiture (Zlesti).

Deux mesures constructives supplémentaires permettent de renforcer davantage les parties supérieures du mur.

Dans certains cas, la présence d'éléments verticaux fixés entre les deux insertions prévient la chute de certaines portions de la maçonnerie (fig.178).

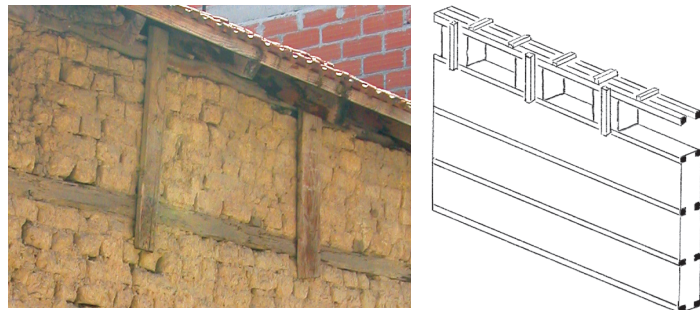


Fig.178 Eléments verticaux entre deux insertions (a, Struga) et schéma de la situation probable en cas de renversement de la maçonnerie (b).

Dans d'autres cas, les jambes de force qui connectent l'avant dernière insertion avec la charpente de la toiture évitent l'écroulement de celle-ci lorsqu'un renversement du dernier segment de la maçonnerie se produit (fig.179) ; en fait, les charges gravitationnelles du toit peuvent être transmises directement au segment du mur se trouvant au-dessous. En outre, leur présence permet également de stabiliser les insertions horizontales en empêchant leur mouvement excessif, pouvant, de fait, conduire à une déstabilisation de la maçonnerie.



Fig.179 Jambes de force entre l'insertion et la charpente (a, Ohrid) et schéma de la situation probable en cas de renversement de la maçonnerie (b).

5.3.6. SOLUTIONS CONSTRUCTIVES PARASISMQUES ET PRÉVENTION

Analyser les caractéristiques des architectures vernaculaires en se référant directement aux dégâts sismiques auxquels elles sont exposées permet d'identifier et mettre en évidence les variations dans la mise en œuvre d'un procédé constructif qui réduisent la vulnérabilité du bâti (tab.26). Une reconnaissance systématique de ces éléments variables favoriserait la constitution d'un inventaire de solutions constructives parasismiques se référant spécifiquement aux architectures d'un lieu. Disposer d'une telle documentation présente plusieurs intérêts pour la pratique architecturale ordinaire touchant au bâti existant.

Tout d'abord, elle pourrait représenter une base de référence pour la réhabilitation en situation ordinaire ainsi que pour la réparation après un impact sismique. En s'appuyant sur un tel inventaire, la probabilité que ces interventions affaiblissent, de manière involontaire, la résistance des ouvrages serait considérablement réduite. En effet, si certains types de travaux répandus de nos jours n'ont pas un niveau d'incidence important sur le comportement structural du bâti ancien²²⁵, d'autres, comme la suppression des insertions horizontales, peuvent en revanche le modifier substantiellement.

Un tel répertoire indiquant les mesures parasismiques présentes au sein de l'architecture vernaculaire constituerait également un outil de sensibilisation à l'égard de l'importance d'adopter des procédés - d'origine ancienne ou récente - adaptés au risque sismique. Cet aspect s'avère essentiel surtout dans les contextes où l'accès à des professionnels spécialisés, en matière de génie parasismique (architectes et/ou ingénieurs), est limité en raison des coûts prohibitifs que cela implique pour les propriétaires. Nombreux sont, de fait, les travaux de rénovation ou d'extension qui, non seulement ne prennent pas en compte le comportement dynamique du bâti ancien (fig.180a) mais qui, de plus, sont effectués en adoptant des techniques, comme celle de la maçonnerie de brique non armée, qui ne se prêtent guère à des régions assujetties aux phénomènes sismiques (fig.180b).



Fig.180 Interventions récentes inadaptées au risque sismique : a) Rénovation du comble en béton armé et en maçonnerie impliquant une augmentation considérable du poids et de la rigidité de l'ensemble structural (Janche) ; b) Rénovation avec des murs en maçonnerie en briques de terre cuite non armée (Lin).

²²⁵ Par rapport à ces types de travaux, on peut noter la récurrence des interventions suivantes : la menuiserie est renouvelée, les façades sont enduites, les insertions horizontales en bois sont recouvertes avec des planches fines ou elles sont peintes pour les rendre plus visibles ou, au contraire, pour les dissimuler.

Paramètres déterminant l'efficacité sismique du procédé constructif	Solutions constructives locales parasismiques	
Dimension des tasseaux de bois	<ul style="list-style-type: none"> • Section suffisamment grande (12x8 cm) pour les considérer comme des éléments rigides • Section avec un rapport largeur-hauteur de 3:2 permettant d'éviter des déformations excessives 	 
Liaison d'angle des insertions	<ul style="list-style-type: none"> • Assemblages résistants à la traction • Continuité des insertions entre tous les murs porteurs, intérieurs et extérieurs 	 
Cohésion transversale des insertions	<ul style="list-style-type: none"> • Espacement entre les traverses de connexion égal ou inférieur à l'épaisseur du mur 	
Raccordement longitudinal des insertions	<ul style="list-style-type: none"> • Clous métalliques avec une bonne résistance à la rouille • Bois imputrescible 	 
Emplacement des insertions dans le plan vertical	<ul style="list-style-type: none"> • Espacement vertical maximal de 150 cm • Disposition des insertions aux niveaux de l'appui des fenêtres et du linteau • Disposition des insertions au niveau du plancher pour l'ancrage des solives • Présence d'entretoises pour l'ancrage des murs extérieurs parallèles aux solives • Jambes de force connectant les solives du plancher à l'insertion • Double insertion au niveau de la toiture pour l'encastrement de la charpente • Espacement vertical très réduit (maximum 60 cm) entre les deux insertions au sommet du bâtiment • Jambes de force connectant la charpente de la toiture à l'insertion • Éléments verticaux fixés aux insertions du segment supérieur de la maçonnerie 	        

Tab.26 Récapitulatif des solutions constructives locales parasismiques, les rapportant aux cinq paramètres déterminant l'efficacité sismique du procédé constructif.

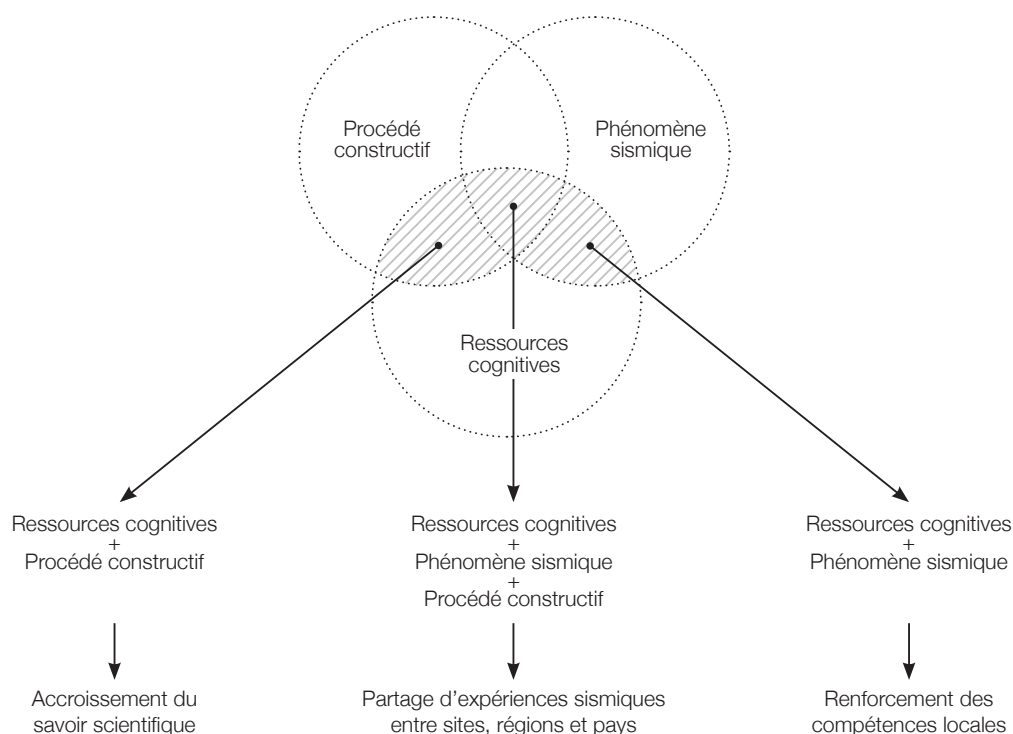
SYNTHÈSE

6. REVITALISER LES RESSOURCES COGNITIVES PARASISMIQUES

Ce dernier chapitre formule des remarques de synthèse en se référant à la thématique principale traitée dans cette partie : les savoirs relatifs aux procédés constructifs vernaculaires ainsi que les modalités de leur acquisition et approfondissement (« ressources cognitives »). Ces considérations sont mises en lien avec les deux autres sujets examinés dans l'étude de cas : le procédé constructif consistant à intégrer des insertions horizontales en bois en forme d'échelle dans des murs porteurs en maçonnerie (« procédé constructif ») et les tremblements de terre de puissance modérée (« phénomène sismique ») (tab.27) :

- le niveau de variation plus ou moins élevé dans la mise en œuvre d'un procédé constructif met en exergue l'intérêt d'effectuer des observations des dégâts après des séismes de puissance modérée - qui sont d'ailleurs les plus fréquents -, afin d'accroître davantage le savoir scientifique sur les mécanismes de rupture propres aux plusieurs variantes constructives locales ;
- le constat de l'incohérence de certaines interventions sur le bâti et l'observation des conséquences néfastes qu'elles peuvent avoir lors d'événements sismiques soulignent la nécessité d'encourager le renforcement des compétences locales via la participation des constructeurs aux missions d'analyse des dégâts, pour une amélioration diffuse et à long terme de connaissances spécifiques;
- compte tenu de l'extension limitée de la zone où se produisent généralement les dégâts lors de séismes modérés, il s'avère important de favoriser une dissémination élargie des enseignements découlant de leur examen, pour que la pratique constructive d'autres sites, limitrophes et lointains, puisse en bénéficier.

Ces trois aspects sont exposés de manière approfondie ci-après, afin de préciser les intérêts présentés par une revitalisation des « ressources cognitives parasismiques », c'est-à-dire de l'ensemble des savoirs et savoir-faire relatifs aux procédés constructifs vernaculaires dont l'efficacité en cas de tremblement de terre a été attestée.



Tab.27 Schéma de synthèse des aspects se rapportant aux trois domaines d'analyses considérés.

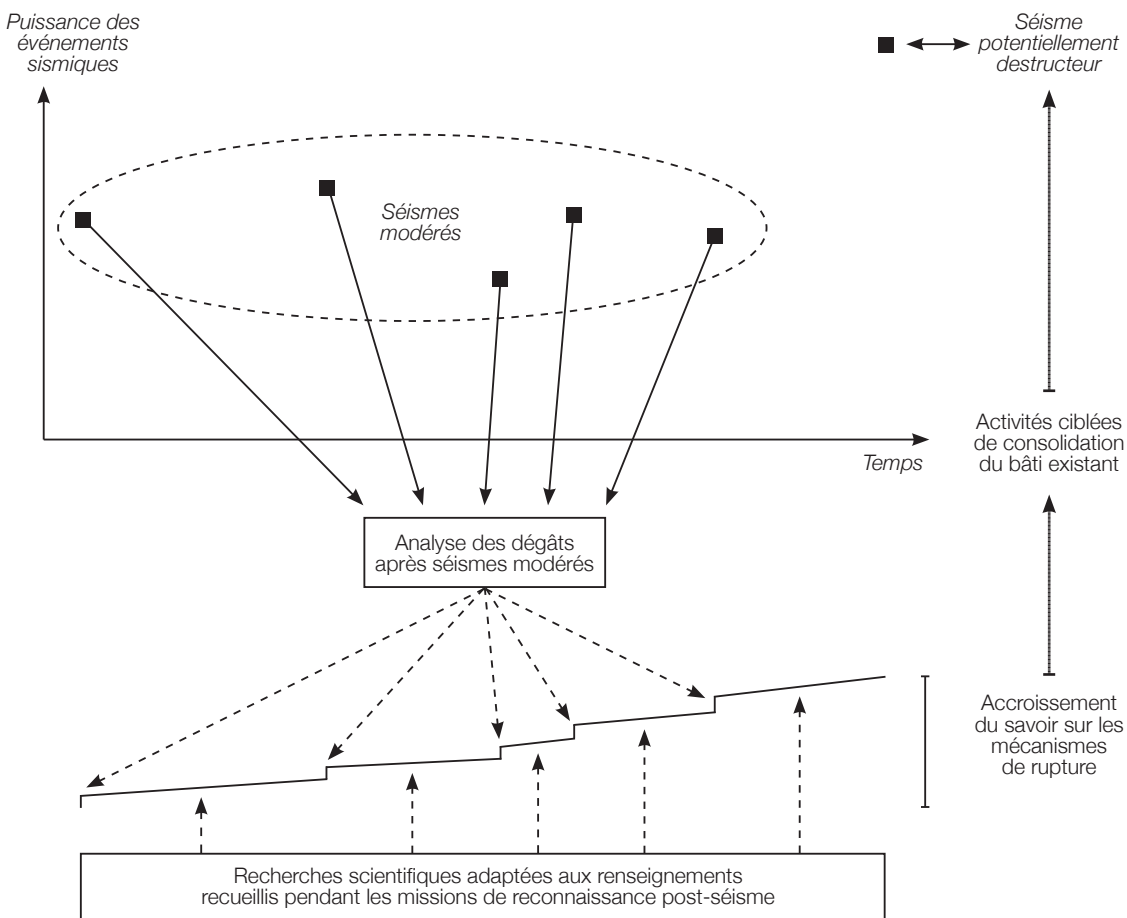
6.1. ACCROISSEMENT DU SAVOIR SCIENTIFIQUE

Les missions de reconnaissance des effets provoqués par des tremblements de terre jouent un rôle de premier plan dans le processus d'accroissement du savoir scientifique relatif au caractère parasismique d'un certain procédé constructif donné. Notamment, celles conduites après des événements sismiques de puissance modérée présentent un intérêt accru.

Compte tenu que la période de retour des événements sismiques modérés est généralement plus réduite que celle de tremblements de terre plus violents, les opportunités d'analyser les dégâts sont multipliées ; aspect qui n'est pas anodin pour la compréhension des mécanismes de rupture propres à un procédé constructif pour lequel on ne dispose que de peu d'informations.

D'autre part, le nombre d'ouvrages complètement effondrés étant, dans ce cas de figure, généralement réduit, il est plus aisé d'établir des relations de cause à effet entre les particularités structurelles des bâtiments correspondant à un même type de structure et les types de dégâts. En pouvant compter sur de nombreux « échantillons » présentant des variations dans la mise en œuvre d'un procédé constructif, les facteurs critiques de ce dernier peuvent ainsi être mieux cernés et les hypothèses à leur égard peuvent être formulées avec davantage de précision. Par exemple, sur la base des dégâts subis par les différentes variantes constructives du type de structure examiné dans cette partie, on pourrait estimer la dimension de l'espacement entre les insertions horizontales au-delà de laquelle le risque de renversement de la maçonnerie devient particulièrement élevé.

D'ailleurs, la vérification de telles hypothèses au travers d'études scientifiques ciblées, notamment par le biais d'essais expérimentaux en laboratoire, permettrait d'accroître davantage la compréhension des forces et des faiblesses des structures présentes dans l'environnement bâti de lieux particuliers ; ce qui de plus épaulerait les activités de consolidation sismique.

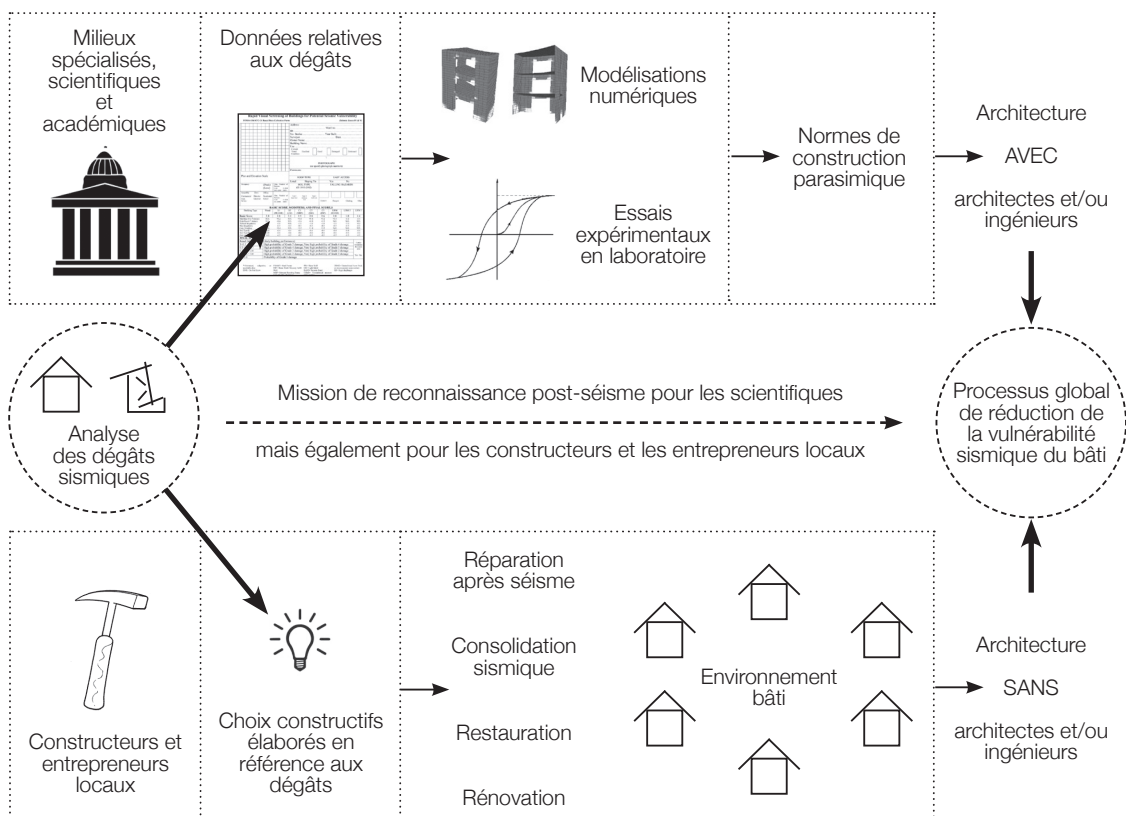


Tab.28 Schéma évoquant l'apport potentiel des analyses conduites après des séismes modérés dans l'accroissement des connaissances relatives aux mécanismes de rupture d'un procédé constructif, ainsi que dans les activités de prévention.

6.2. RENFORCEMENT DES COMPÉTENCES LOCALES

Le bâti vernaculaire est régulièrement assujéti à des transformations, tant au niveau architectural que structurel, en raison du constant changement des aspirations et des besoins de ses habitants, au cours du temps. Dans les contextes où des normes de construction se référant aux spécificités de l'architecture vernaculaire n'existent pas ou ne sont tout simplement pas respectées, il apparait indispensable d'intégrer la participation des principaux acteurs locaux travaillant sur le bâti existant (constructeurs et entrepreneurs) aux missions de reconnaissance des dégâts sismiques. En effet, des lacunes cognitives envers les facteurs à la base de l'efficacité sismique des procédés constructifs adoptés traditionnellement conduisent parfois à des interventions qui peuvent augmenter la vulnérabilité des ouvrages. Par exemple, dans les maçonneries en moellons comprenant des insertions horizontales en bois, la suppression de celles-ci amplifie considérablement le risque de renversement des unités maçonnées comme aussi la probabilité d'une séparation des murs perpendiculaires. La compréhension de la part des constructeurs locaux des causes des différents mécanismes de rupture auxquels les ouvrages sont exposés ainsi qu'une prise de conscience accrue à l'égard de particularités structurelles les empêchant, permettrait de renforcer les compétences locales sur le comportement sismique de l'environnement bâti. Les connaissances acquises se référant directement aux types de structures sur lesquels les constructeurs travaillent, la transposition de ces enseignements dans la pratique ordinaire serait spontanée et, très probablement, plus diffuse.

Le processus d'apprentissage à partir des séismes (*learning from earthquakes*) ne doit donc pas être circonscrit aux ingénieurs spécialisés en matière de génie parasismique et aux chercheurs des milieux scientifiques et académiques, mais il devrait être également promu parmi les acteurs locaux. L'intérêt d'encourager une telle dynamique se réfère également au constat que les leçons tirées par les spécialistes à partir des missions de reconnaissance post-séisme ne leur parviennent pas toujours. De plus, elle permettrait d'accréditer le rôle que les entrepreneurs et les constructeurs pourraient jouer dans le processus de réduction globale de la vulnérabilité. Ce point est décisif du fait que la qualité des interventions contemporaines sur le bâti ancien dépend effectivement de leurs compétences, le service fourni par les architectes et/ou les ingénieurs étant souvent financièrement inaccessible aux propriétaires.



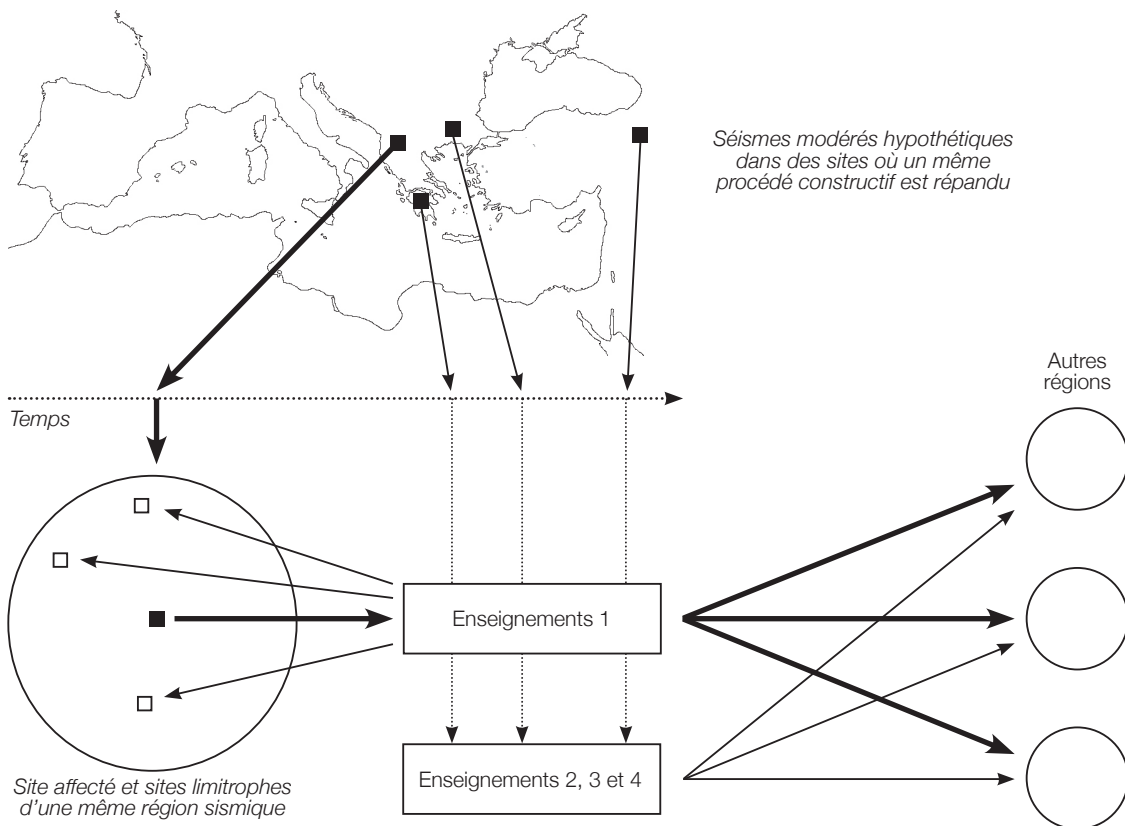
Tab.29 Schéma synthétisant l'implication bénéfique que pourrait avoir la participation de constructeurs et d'entrepreneurs locaux aux missions de reconnaissance post-séisme dans le processus de réduction de la vulnérabilité sismique du bâti.

6.3. PARTAGE D'EXPÉRIENCES SISMIQUES ENTRE SITES, RÉGIONS ET PAYS

Les tremblements de terre de puissance modérée ont généralement des effets dans une zone géographique restreinte ; le nombre de bâtiments endommagés et de personnes concernées peut donc être très faible en fonction du taux d'urbanisation du lieu affecté.

Les missions d'analyse des dégâts provoqués par de tels événements peuvent, néanmoins, être considérées comme des sources de renseignements utiles également pour les sites limitrophes, villes et villages épargnés par les secousses mais se situant à l'intérieur de la même région sismique. Par exemple, les deux tremblements de terre qui ont eu lieu lors de l'étude sur le terrain conduite en Macédoine (M 4.4 et M 4.5) ont concerné seulement deux villages pour un total d'un millier d'habitants ; toutefois, nombreux sont les agglomérations avoisinantes exposées au même niveau de risque. De plus, les renseignements recueillis dans un site après un événement sismique peuvent être utilisés aussi dans des autres pays où le bâti vernaculaire se caractérise par des types de structures similaires. Le processus d'apprentissage à partir d'impacts sismiques particuliers ne se limiterait ainsi pas au seul endroit ayant subi directement les effets mais il pourrait concerner une échelle territoriale bien plus vaste, régionale voire internationale. En fait, dans un certain pays, les leçons tirées lors de séismes ayant affecté le territoire national peuvent être additionnées, combinées et croisées, avec celles provenant d'ailleurs, augmentant sensiblement le nombre d'expériences de référence sur lesquelles la recherche scientifique, la pratique constructive et les activités de prévention du risque peuvent se baser.

De nos jours, une dissémination accrue des connaissances relatives à l'efficacité sismique des procédés constructifs vernaculaires peut jouer un rôle décisif. Les renseignements recueillis et leur diffusion à une échelle étendue pourrait effectivement pallier l'affaiblissement du processus traditionnel de transmission, entre générations successives de bâtisseurs, des savoirs et savoir-faire qui y étaient associés.



Tab.30 Schéma indiquant les modalités selon lesquelles pourrait avoir lieu la propagation à l'échelle régionale et internationale des enseignements, relatifs à l'efficacité sismique d'un procédé constructif, tirés après des séismes de puissance modérée.

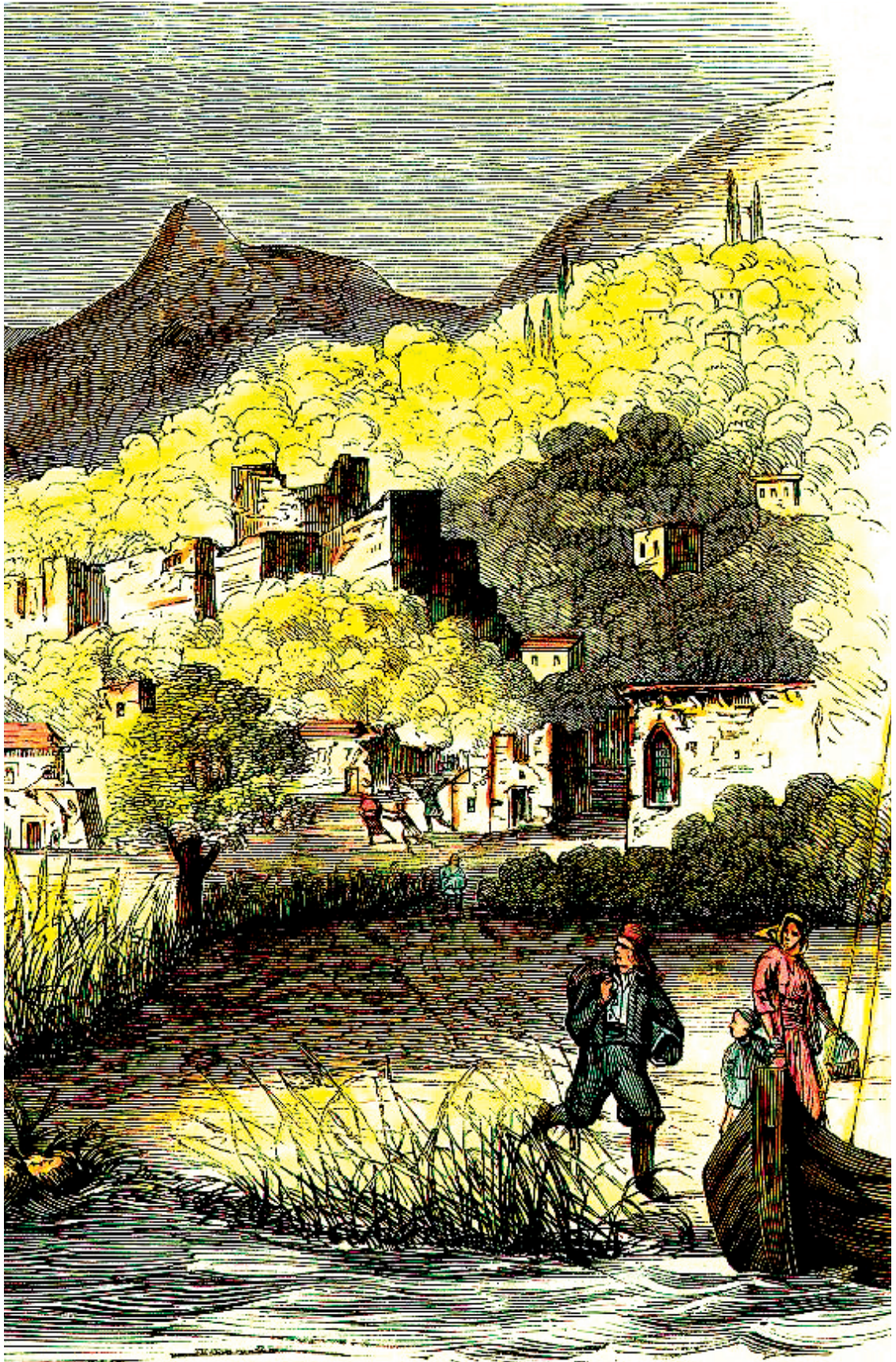


Fig.181 Tremblement de terre ayant affecté la ville de Vlorë (Albanie) en 1851: gravure sur bois d'auteur inconnu publiée dans le journal allemand *Illustrierte Zeitung* en 1851 (Source : Kozák et Cermák 2010).

Conclusion et perspectives

Tout au long de cette recherche, les architectures vernaculaires ont été analysées comme partie intégrante de cultures du risque étroitement reliées aux phénomènes sismiques. Pour ce faire, les environnements bâtis ont été considérés depuis des perspectives complémentaires. Ils ont été étudiés comme milieux imprégnés de stratégies de résilience se rapportant à des mesures réduisant la vulnérabilité des constructions ainsi qu'à des attitudes et comportements précautionneux adoptés par les populations. Parallèlement, les architectures qui les composent ont été examinées en tant que témoin de solutions constructives adaptées à la sismicité historique des lieux, donc à la puissance et à la fréquence des tremblements de terre s'étant produits au fil des siècles. Elles ont également été perçues comme l'expression de savoirs et savoir-faire se rapportant aux effets induits par des sollicitations horizontales sur le bâti et, en particulier, aux mécanismes de rupture qui leur sont propres.

Les éléments qui ont émergés de l'adoption de cette approche d'analyse explicitent, de manière manifeste, l'importance d'inclure les cultures vernaculaires du risque dans la gestion du patrimoine architectural comme dans l'ensemble des activités visant à la protection sismique tant du bâti existant que des milieux humains. En effet, qu'elles soient d'origine ancienne ou récente, ne pas considérer les différentes cultures du risque comme une véritable source d'inspiration - au point de vue technologique et méthodologique - signifierait négliger un grand nombre de ressources cognitives et pragmatiques, souvent génératrices de solutions appropriées au contexte dans lequel elles se façonnent. Un tel abandon conduit inévitablement à l'appauvrissement des « *banques de données* » individuelles et collectives (Lovelock 1993) : ensembles d'informations structurées d'où on puise les idées et les savoirs pour faire face aux différents enjeux auxquels on est confrontés. Les manières d'un individu ou d'une communauté de se rapporter aux phénomènes naturels ou culturels, ordinaires comme extraordinaires, y sont, de fait, dialectiquement liées. Face à cela, est-il souhaitable d'attribuer à un « *principe universel* » ou à une « *tradition rigide* », « *le droit exclusif de traiter la connaissance, avec pour conséquence que tout résultat obtenu par d'autres méthodes est éliminé sans appel ?* » (Feyerabend 1988, p.16-17).

Ce chapitre présente des considérations conclusives et une mise en perspective des potentiels et des limites d'une exploration du lien entre les architectures vernaculaires et le *facteur séisme* par une approche associant aspects culturels, structurels et cognitifs.

1. APPRÉCIATION DU CARACTÈRE PARASISMIQUE DU BÂTI VERNACULAIRE, ENTRE PERFORMANCE ET INTUITION

L'estimation de la capacité d'une construction à faire face à des tremblements de terre s'effectue par la prise en compte de données, dont le type et le nombre varient en fonction des objectifs spécifiques à l'origine d'une telle investigation.

En vue de l'identification des ouvrages susceptibles d'être les plus vulnérables, un examen rapide est habituellement effectué afin de documenter, pour chaque construction, ses caractéristiques générales (forme, dimensions, hauteur, qualité d'exécution et état actuel) mais surtout ses propriétés constructives, soit le type de structure et les particularités exerçant potentiellement une influence marquée sur son comportement sismique. Cet examen se nourrit parfois d'informations supplémentaires, recueillies en se référant à la période de réalisation de l'ouvrage, permettant de fait d'en savoir plus à l'égard d'un procédé constructif spécifique.

Pour une étude plus détaillée, nécessaire afin de pouvoir déterminer avec précision le niveau de vulnérabilité d'un bâtiment, la consultation de dossiers établis lors de sa réalisation constitue une activité clé : elle permet de comprendre de manière approfondie ses spécificités grâce à des informations sur des détails dissimulés à l'intérieur même de la construction, qui seraient autrement difficiles à saisir.

L'appréciation de la vulnérabilité du bâti vernaculaire ne peut toutefois pas systématiquement s'appuyer sur l'ensemble de ces éléments. En effet, la conception des architectures dénommées *non-engineered structures* n'est quasiment jamais accompagnée par la mise en forme de dossiers décrivant leur anatomie structurelle et les détails constructifs. En outre, les procédés qui étaient répandus autrefois ne sont aujourd'hui pas forcément connus avec une précision suffisante permettant de déceler les éventuelles mesures de prévention mises en œuvre par les bâtisseurs. L'étude de la résistance sismique peut cependant s'appuyer sur deux aspects intrinsèques au bâti vernaculaire : son ancienneté et une utilisation diffuse, au cours de plusieurs générations et dans plusieurs régions, des procédés constructifs qui lui sont propres.

En raison de ces deux aspects, les méthodes couramment employées pour estimer la vulnérabilité du bâti existant peuvent s'accompagner d'une approche méthodologique prenant en compte deux facteurs spécifiques : la performance historique du procédé constructif adopté ainsi que les corrélations entre ses différentes particularités structurelles et le phénomène sismique.

1.1. S'APPUYER SUR DES MODÈLES CONSTRUCTIFS DE RÉFÉRENCE

La vulnérabilité d'un bâtiment peut être évaluée sur la base d'informations relatives à la performance sismique d'autres constructions présentant le même type de structure, selon une démarche qui est propre à la méthode d'analyse de l'« anamnèse familiale », couramment employée en médecine. Cette méthode se focalise sur l'état de santé des membres de la famille du sujet soigné : en pratique clinique, elle constitue un « *outil important [...] permettant d'évaluer un risque accru de développer certaines maladies car elle tient compte de facteurs génétiques et environnementaux présents dans une famille* » (Bochud et al. 2009). Transposée au domaine de l'architecture, la méthode de l'anamnèse familiale constitue un moyen particulièrement utile pour investiguer et saisir la capacité d'un certain ouvrage à résister à des éventuelles sollicitations sismiques. Son niveau de prédisposition à subir des dommages peut être estimé en se référant aux pathologies communes à des constructions structurellement proches et, en particulier, à l'importance des dégâts que celles-ci ont présenté lors de tremblements de terre du passé, lointain ou récent (Doglioni & Angeletti 1994).

Selon une telle démarche, la résistance d'un bâtiment n'est donc pas évaluée en se basant exclusivement sur l'étude des réactions mécaniques qui peuvent se générer, mais également au travers de la comparaison entre ses caractéristiques constructives et celles d'autres ouvrages, dont la performance sismique est connue. Les similitudes et/ou les dissemblances structurelles qui peuvent se présenter

apportent des éléments indicatifs, mais néanmoins très représentatifs, au regard de la capacité du bâtiment considéré à faire face à des tremblements de terre. Une forte analogie avec des constructions dont la résistance a été attestée au cours du temps deviendrait, ainsi, un indice quant à sa propension à se conserver pendant ces phénomènes, voire même preuve d'un élevé niveau de sécurité.

L'intérêt d'identifier les différents types de structures vernaculaires qui ont démontré un bon comportement, lors d'événements sismiques du passé, devient alors évident : cette identification permet en effet de déterminer des modèles constructifs « concrets » - l'équivalent de la famille du patient - auxquels se référer, selon une démarche d'analyse prenant en compte les spécificités intrinsèques de l'objet étudié et les faits antécédents.

Ces modèles de référence peuvent se rapporter à plusieurs niveaux, tels que l'approche constructive ou les caractéristiques du système porteur.

Ainsi, certaines architectures pourront être associées au modèle correspondant à l'approche de l'attachement au sol, en raison de leur conformation trapue, tandis que d'autres révéleront plutôt un modèle basé sur un détachement partiel de la superstructure, selon le principe de l'isolation sismique. D'autre part, la bonne performance du bâti vernaculaire est souvent corrélée au type de système porteur vertical. En fait, bien que le comportement sismique d'un ouvrage soit déterminé par l'ensemble des parties structurelles qui le compose - donc, en fonction aussi de la nature du système porteur horizontal -, le risque d'effondrement d'une construction vernaculaire dépend, en premier lieu, de la nature de ses éléments verticaux. Tel est, par exemple, le cas de constructions qui se caractérisent par des murs en maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois, par une ossature bois avec ou sans remplissage, ou encore par un système porteur double. Le bon comportement structural qu'elles ont démontré à maintes reprises résulte d'un niveau de ductilité et d'un degré de redondance particulièrement élevés du système porteur vertical ; caractères qui améliorent la résilience de l'ensemble du bâtiment, en évitant son effondrement même en présence de dommages importants.

En outre, les types de dégâts subis par les ouvrages réalisés avec un même procédé constructif - appartenant donc à un même modèle de référence - présentent, dans la très grande majorité des cas, de fortes analogies. Bien que nombreuses soient les particularités propres à chaque construction influençant la portée des dommages encourus, l'estimation du niveau de résistance effective d'un certain bâtiment peut, pour davantage de fiabilité, se fonder sur l'examen du degré de ressemblance entre des ouvrages structurellement proches. En effet, la comparaison entre ses caractéristiques et les facteurs qui ont été reconnus comme augmentant la vulnérabilité de constructions similaires, apporte des renseignements de référence sur les mécanismes de rupture les plus probables ainsi que sur l'importance de leurs répercussions au niveau structurel. Par ailleurs, se focaliser sur les éléments structuraux distinctifs à l'ensemble des ouvrages présentant le même type de système porteur vertical (p.e. les segments horizontaux en maçonnerie des murs comprenant des insertions horizontales) permet de cerner les facteurs principaux à l'origine des dommages possibles (tels qu'une mauvaise cohésion entre les unités maçonnées entraînant leur renversement) comme les facteurs spécifiques pouvant empêcher leur formation (tels qu'un espacement vertical réduit entre les insertions).

Une mémoire des modèles constructifs vernaculaires

L'appréciation du niveau de prédisposition du bâti vernaculaire à subir des dégâts peut donc s'accomplir au travers de l'interprétation des renseignements relatifs à la performance historique des procédés constructifs. Pour ce faire, il est toutefois nécessaire de pouvoir compter sur une « *mémoire experte* » (Doglioni 2000), soit une documentation de référence relative aux effets induits par les tremblements de terre sur le bâti. Cette notion de mémoire experte a été conçue par un groupe de chercheurs italiens (Université IUAV de Venise) pour étudier les monuments historiques, notamment des églises ; sa transposition au bâti vernaculaire « ordinaire » avec le développement de supports spécifiques à chaque modèle constructif, présenterait un intérêt à plusieurs égards.

En effet, la probabilité que des dégâts structuraux préjudiciables pour la stabilité des ouvrages se produisent pourrait être effectivement déterminée sur la base de renseignements se référant aux mécanismes de rupture, probables ou possibles, propres aux différents procédés constructifs. Si pour juger la résilience de structures possédant une configuration régulière et compacte, une telle

démarche peut suffire, dans les cas de bâtiments structurellement plus complexes, elle peut favoriser la reconnaissance des aspects nécessitant un approfondissement ultérieur pour parvenir à une meilleure compréhension de leur vulnérabilité. L'utilisation d'une telle documentation de référence suppose, néanmoins, de récolter un nombre conséquent de renseignements relatifs à l'efficacité sismique de chaque procédé adopté par les bâtisseurs vernaculaires et aux types de dégâts qui lui sont propres. Dans cette perspective, se référer aux tremblements de terre de puissance modérée, beaucoup plus fréquents que ceux plus intenses, aurait l'avantage de favoriser une accumulation de données dans de brefs délais et, donc, d'accélérer l'accroissement du savoir à ce sujet.

L'intérêt de constituer une mémoire experte qui soit spécifique à chaque modèle constructif vernaculaire dépasse des questions strictement liées à l'estimation de la résistance sismique du bâti existant. Les interventions ordinaires ainsi que les travaux de consolidation sismique et/ou de réparation post-séisme pourraient s'appuyer sur une connaissance fine à l'égard des propriétés de l'objet considéré. Cet aspect est essentiel pour l'élaboration d'activités techniquement fiables, économiquement viables et cohérentes avec le langage architectural et structurel du bâti sur lequel on intervient. L'identification des forces et des faiblesses d'un bâtiment permet, de fait, de canaliser les efforts sur les défauts reconnus comme urgents à résoudre, par le biais d'actions atténuant les mécanismes de rupture déjà activés, ou empêchant ceux qui sont les plus probables. D'autre part, intervenir de manière ponctuelle et ciblée favorise une optimisation des dépenses ; en conséquence, les coûts résultant de l'importante main d'œuvre qui est souvent nécessaire (notamment pour les travaux de maçonnerie) et/ou de l'emploi de matériaux coûteux (tels que du bois imputrescible) pourraient être, en partie, compensés.

1.2. SAISIR LES CORRÉLATIONS ENTRE LES PARTICULARITÉS STRUCTURELLES ET LE PHÉNOMÈNE SISMIQUE

Une compréhension approfondie de la réponse sismique du bâti vernaculaire peut se révéler compliquée en raison de la variabilité des matériaux en place et des détails constructifs adoptés, qui rendent particulièrement difficile l'évaluation de leur influence sur le comportement structural d'une construction donnée. Pour apprécier sa résistance sismique, il s'avère ainsi pertinent, voire indispensable, de concevoir le bâti vernaculaire en tant qu'expression d'une culture constructive, au sein de laquelle le *facteur séisme* était systématiquement pris en compte. Depuis cette perspective, la résilience d'un bâtiment peut de fait être déduite à partir des mesures parasismiques que lui-même enferme. À cet égard, trois démarches distinctes appuient une analyse et une caractérisation des particularités, forces et faiblesses, des environnements bâtis vernaculaires.

Apprendre du post-séisme

En premier lieu, la résilience d'un ouvrage peut être investiguée sur la base des renseignements recueillis, dans la même région mais également dans d'autres pays, pendant des missions de reconnaissance post-séisme. De fait, se référer à plusieurs bâtiments similaires affectés par des tremblements de terre facilite l'identification de mesures mises en œuvre en vue de prévenir et/ou d'atténuer les dégâts, ainsi que pour réduire une mise en danger des personnes.

Lors de ces missions, l'analyse des systèmes porteurs verticaux permet non seulement de saisir les facteurs empêchant les mécanismes de rupture mais également de découvrir, en cas de destruction partielle, les dispositifs dissimulés dans la construction qui ont contribué à atténuer la gravité et/ou l'étendue des dommages.

D'autre part, la compréhension de la séquence de destruction totale ou partielle d'une structure favorise la reconnaissance d'astuces qui permettent de retarder son effondrement. Dans le bâti vernaculaire, nombreuses sont les mesures constructives faisant que les dommages se développent progressivement, de manière non abrupte et relativement lente. Leur identification et documentation favorisent une mise en évidence des spécificités propres à un certain ouvrage qui permettent de rallonger le temps à disposition des habitants pour se mettre à l'abri, en cas de secousses particulièrement puissantes.

L'examen attentif de bâtiments affectés facilite également l'identification de solutions mises en œuvre afin de diminuer le plus possible le risque pour les personnes. Par exemple, la manière dont certains éléments architecturaux sont réalisés, tels que les parties saillantes fabriquées avec des matériaux légers, permet de réduire considérablement la probabilité de blessures et de morts en cas de chute. De ce fait, ces mesures sont à considérer comme faisant partie intégrante de la dimension constructive d'une culture du risque ; et cela bien qu'elles n'aient pas forcément une influence directe sur le comportement structural des ouvrages lors d'un séisme.

Apprendre des sismicités historiques

La prédisposition d'un bâtiment à subir des dommages peut également être investiguée en se rapportant à la diffusion territoriale de ses particularités structurelles, selon deux modalités distinctes et complémentaires.

D'une part, les dispositions et les dispositifs constructifs peuvent être examinés de manière isolée, en les considérant comme des facteurs qui augmentent ou, au contraire, réduisent la résistance des ouvrages. Dans cette logique, l'examen des variations constructives parmi des bâtiments appartenant à une même classe typologique et situés dans des sites avec des sismicités historiques différentes, permet de reconnaître les éléments variables qui sont susceptibles d'exercer une influence marquée sur leur comportement dynamique. En considérant simultanément leur diffusion territoriale et les sismicités historiques des lieux, on peut déduire le niveau d'efficacité de chaque particularité : celles adoptées dans les lieux les plus sismiques sont susceptibles d'être davantage efficaces que celles répandues dans les régions avec une sismicité moindre. Ce faisant, la capacité d'un certain ouvrage à résister à des éventuels tremblements de terre peut être déduite en comparant ses particularités structurelles avec celles d'autres bâtiments similaires situés dans des sites avec une sismicité supérieure ou inférieure.

D'autre part, un ouvrage peut être également examiné en tant que variante constructive d'un certain type de structure. Par exemple, dans le cas des architectures en maçonnerie en moellons comprenant des insertions horizontales en bois, plusieurs variantes peuvent être déterminées en fonction de la forme de ces dernières, de leur espacement vertical et du type d'assemblage adopté. L'adéquation des propriétés structurelles du bâtiment considéré par rapport au niveau local de risque peut donc être évaluée en comparant la sismicité historique du site dans lequel il se situe à celle d'autres régions où des ouvrages présentant exactement les mêmes caractéristiques sont répandus. Si les tremblements de terre qui ont eu lieu au fil des siècles dans ces endroits sont d'une puissance égale ou supérieure à ceux ayant historiquement concerné le site considéré, le niveau de vulnérabilité du bâtiment étudié peut être estimé comme étant relativement faible. En effet, la large diffusion d'une variante constructive particulière au sein du bâti d'un lieu est susceptible de témoigner de sa conformité avec les contraintes environnementales locales.

Apprendre d'autres sources

L'importance de certaines particularités structurelles présentes dans un bâtiment spécifique peut être saisie en se référant à des sources écrites anciennes et/ou aux connaissances préservées dans la mémoire vivante.

Certains dessins et illustrations présents dans des traités d'architecture, des encyclopédies ou encore des dictionnaires raisonnés (Rondelet 1834; Viollet-Le-Duc 1856; Choisy 1899; Masciari-Genoese 1915) facilitent une compréhension de l'art de bâtir d'une époque donnée. Bien que ce dernier se réfère, en premier lieu, à des ouvrages monumentaux, tels que des bâtiments religieux et/ou militaires, les procédés employés pour leur réalisation présentent souvent des ressemblances avec ceux adoptés pour le bâti résidentiel ordinaire.

Parallèlement, les documents historiques peuvent permettre la reconnaissance d'éventuelles prescriptions ou recommandations promulguées, au niveau local, pour augmenter la résilience de l'environnement bâti. En fait, certaines caractéristiques qui lui sont propres peuvent être la résultante de réactions collectives, institutionnelles ou spontanées, à des tremblements de terre particulièrement violents ayant conduit à une « normalisation » de mesures constructives spécifiques étroitement corrélées à ces phénomènes.

De plus, les raisons qui fondent certains choix constructifs effectués par les bâtisseurs vernaculaires peuvent être approfondies en faisant appel à ceux qui encore détiennent des savoirs particuliers à leur égard. Étant donné que c'est principalement à partir de la deuxième partie du XX^e siècle que les pratiques vernaculaires ont été progressivement délaissées, certaines connaissances subsistent encore au niveau local. Celles-ci ne sont pas forcément répandues parmi les professionnels de la construction ; elles sont plutôt préservées dans la mémoire des personnes âgées qui peuvent, en outre, avoir directement participé à la réalisation de bâtiments correspondant au type de structure étudié.

Les renseignements recueillis par le biais de ces démarches d'analyse, considérant un large éventail de sources et de types d'informations, appuient de manière directe et multi-référentielle l'acquisition d'une compréhension approfondie de la vulnérabilité d'un bâtiment particulier. À cet effet, l'adoption d'une « *pensée de la substance* », focalisée sur l'anatomie structurelle du bâti, doit, néanmoins, être combinée à une « *pensée de la relation* » (Forest & Faucheux 2013, p.507), se concentrant sur les corrélations entre les caractéristiques constructives et le *facteur séisme*. L'intérêt de cette dernière découle du constat que « *trouver du lien là où il n'en existait pas* » forcément et/ou de manière explicite - comme entre la présence d'insertions horizontales en bois dans les murs en maçonnerie et un niveau élevé de sismicité - s'avère essentiel pour appréhender davantage le caractère parasismique des architectures vernaculaires ; ceci en prenant en compte des analyses multi-spatiales et multi-temporelles, établissant des liens entre les cultures constructives de plusieurs lieux et de différentes époques.

1.3. POUR UNE FORMALISATION DES « RÈGLES DE L'ART » VERNACULAIRES PARASISMIQUES

Une approche méthodologique d'étude du bâti ancien se référant simultanément à la performance historique des procédés constructifs et aux facteurs de corrélation entre ses particularités structurelles et le phénomène sismique, concourt à une reconnaissance et à une valorisation des mesures de protection qui se sont affirmées au sein de cultures vernaculaires. Celles-ci se rapportent tant à des dispositions constructives caractérisant les systèmes porteurs verticaux (p.e. un type particulier d'appareillage des maçonneries ou une certaine trame d'ossature) qu'à des dispositifs spécifiques intégrés dans l'ensemble structurel de manière ponctuelle (tels que des éléments horizontaux en bois inclus dans les murs ou des types d'assemblages spéciaux). Ces solutions ne coïncident pas forcément avec la meilleure façon de construire pour se protéger contre les tremblements de terre, mais elles correspondent plutôt à la manière retenue comme optimale par les bâtisseurs d'une certaine période et d'un certain lieu, en relation au niveau local de risque sismique ainsi qu'à d'autres aspects, tels que le degré de dégâts toléré ou les ressources et les compétences disponibles. Contribuant de manière décisive à éviter l'effondrement total des constructions et, donc, à assurer la sécurité de leurs habitants, elles sont à percevoir comme de véritables règles vernaculaires parasismiques de l'art de bâtir.

Appréhender ces règles en tant que clé de lecture du bâti ancien soutient la compréhension des modèles constructifs - collectivement partagés dans un lieu à un moment donné - auxquels les bâtisseurs se sont rapportés lors de la conception et la réalisation des ouvrages. Les « règles de l'art » qu'un bâtiment enferme peuvent être effectivement considérées comme l'expression du modèle adopté par les bâtisseurs ; un modèle qui servait autrefois à rappeler la « bonne manière » de bâtir et qui, aujourd'hui, permet de mieux cerner le caractère parasismique de leurs ouvrages. La prise en compte de l'ensemble de ces « règles de l'art » dans les méthodologies d'analyse couramment employées pour estimer la vulnérabilité du bâti, permettrait, donc, d'accroître la fiabilité des résultats. Notamment, leur compréhension fine s'avère particulièrement utile pour les approches d'étude considérant les ouvrages selon des classes typologiques.

La transposition des « règles de l'art » vernaculaires parasismiques, décelables dans un territoire donné, en des outils opérationnels (p.e. des fiches illustrées) constitue, ainsi, une étape essentielle. Elle permet de créer des conditions d'accès à une expertise critique basée, d'une part, sur les modèles théoriques élaborés relativement aux savoirs en génie parasismique et, d'autre part, sur les modèles concrets affinés au fil des siècles par l'intuition constructive des bâtisseurs, dont la pertinence a été attestée.

2. VERS UNE RECONNAISSANCE DES STRATÉGIES VERNACULAIRES PARASISMIQUES, ENTRE TECHNOLOGIE ET ANTHROPOLOGIE

Considérer les environnements bâtis vernaculaires en tant qu'accomplissement du lien entre l'Homme (avec ses savoirs, savoir-faire et représentations), la technologie qu'il a développée (avec ses matériaux et procédés) et le territoire qu'il habite (avec ses ressources et ses contraintes) favorise la redécouverte des cultures du risque développées dans le passé. Plus important, l'adoption de cette perspective facilite la reconnaissance des aspects qui « connectent », de manière substantielle, ces dernières à la résilience des sociétés contemporaines.

Résultant d'une réaction de type morphogénétique au phénomène sismique, la dimension constructive d'une culture du risque « ancienne » concourt à la sécurité des environnements bâtis actuels, en incluant des mesures tant de prévention que de réparation. De nos jours, l'attention portée à leur égard lors de transformations architecturales et structurales est étroitement corrélée à la connaissance des différents groupes d'acteurs - scientifiques, professionnels de la construction, représentants des institutions publiques et habitants - sur les raisons qui ont conduit les bâtisseurs du passé à les mettre en œuvre. Un niveau élevé de connaissance sur les spécificités du bâti vernaculaire doit en conséquence être constamment assuré, afin que l'apport d'une culture du risque sur la résilience d'un environnement construit ne s'affaiblisse pas, au cours du temps, par le biais d'interventions structurellement inadéquates.

À cet effet, deux activités distinctes peuvent favoriser une diffusion de cette connaissance, en rendant plus perméable la ligne de séparation entre les cultures constructives vernaculaires parasismiques et les acteurs de la construction : les professionnels travaillant sur le terrain (constructeurs, entrepreneurs, architectes, ingénieurs, maçons, charpentiers) comme les populations (propriétaires, habitants, auto-constructeurs) des lieux menacés.

D'une part, une participation systématique des professionnels de la construction aux missions de reconnaissance post-séisme permettrait un renforcement des compétences locales sur les modes et les mécanismes de rupture propres aux différents types de structures ainsi que sur les facteurs qui se sont révélés être efficaces pour les atténuer et/ou les éviter. Cette activité peut en outre s'accompagner, de manière complémentaire, d'autres initiatives, telles que la dissémination de documents relatifs aux qualités et aux insuffisances des procédés constructifs vernaculaires répandus localement.

D'autre part, des séances d'information ouvertes au grand public et organisées dans l'environnement bâti (p.e. visites guidées), en situation ordinaire comme après des événements sismiques, favoriseraient une prise de conscience de la part de la population au regard des particularités de leur milieu de vie qui correspondent à la dimension constructive de la culture locale du risque.

La résilience des sociétés est également subordonnée à la perception du risque au sein de la population, constituant, de fait, un facteur mobilisateur d'actions de prévention dans le bâti.

Cette perception est, certes, influencée par les communiqués promulgués par les institutions publiques en charge de la protection de la population, mais elle l'est de même par l'ensemble des éléments qui peuvent stimuler un processus de restauration mémorielle des tremblements de terre historiques et/ou des réponses adoptées pour en atténuer les effets. Ces éléments sont transmis dans certains mythes et contes traditionnels, mais ils peuvent aussi coïncider avec des artefacts à connotation symbolique visibles dans l'environnement construit. Leur prise en compte et assimilation dans la gestion du patrimoine architectural et, plus généralement, dans les stratégies de prévention constituent une composante indispensable du processus de renforcement de la résilience. L'impact de leur abandon ou suppression, en particulier de ceux rapportés à la sphère matérielle, peut de fait avoir des effets directs sur le niveau de sensibilité sismique des habitants des lieux menacés et, donc, sur la quantité et sur la qualité des mesures constructives de protection mises en œuvre.

Parallèlement, l'incidence des cultures du risque sur la résilience actuelle renvoie aussi à l'influence des interprétations des tremblements de terre, diffuses au sein des cultures populaires traditionnelles, sur la manière des individus et/ou d'une communauté entière de se rapporter à ces phénomènes.

Les cultures populaires incluent des interprétations qui encouragent certains comportements et attitudes relativement au sens attribué aux signes sismiques (en particulier, aux secousses en cours et aux événements perçus en tant que précurseurs) comme également à la signification du phénomène

à leur origine, souvent avec des connotations religieuses ou mythologiques. Ainsi, elles concourent directement à la détermination du niveau de vulnérabilité des milieux humains, en l'augmentant ou en la réduisant selon la nature des messages véhiculés. Il s'avère par conséquent important de considérer l'ensemble des croyances et savoirs traditionnels, non pas dans l'optique de les affaiblir *a priori* dès lors qu'ils sont retenus comme non conformes aux points de vue prépondérants au sein des sociétés actuelles mais, plutôt, dans l'optique de saisir en quelle mesure ils peuvent contribuer à une optimisation et à un renforcement des moyens culturels de gestion des catastrophes.

Ces croyances et savoirs traditionnels devraient, en outre, être pris en compte non seulement par rapport à leur contenu, mais également en relation aux modalités par lesquelles leur transmission s'effectue au sein d'un groupe d'individus ou entre plusieurs communautés ; la sensibilité sismique des habitants des lieux menacés y est intrinsèquement liée. Pendant des moments critiques, comme lors d'une séquence sismique, cette sensibilité peut se renforcer au travers de la collectivisation de références sur les expériences du passé, en stimulant l'adoption de comportements et de mesures temporaires qui visent de manière explicite à une réduction accrue du niveau d'exposition au risque.

La reconnaissance de l'ensemble des réponses vernaculaires de protection sismique qui exercent une incidence marquée sur le niveau actuel de vulnérabilité du bâti et des populations, contribue à inscrire le concept de résilience dans un contexte géographiquement et historiquement situé, s'ancrant à l'histoire du lieu. Leur compréhension rend intelligible l'interaction entre les dynamiques sociétales contemporaines et les cultures du risque « anciennes ». Elle s'avère donc nécessaire pour s'appuyer sur « *une subjectivité constructive* », permettant de « *maîtriser les problèmes complexes [comme ceux induits par le phénomène sismique] d'une manière critique et interdisciplinaire* » (Jean Vogt 1996 dans Fréchet & Albin 2008, p.12, trad. M.H.).

Dans cette perspective, le franchissement des frontières délimitant les branches de recherche centrées sur des questions d'ordre technologique et celles focalisées sur les cultures anthropologiques des lieux constitue un passage obligé.

D'un côté, les connaissances en histoire de l'architecture apportent des informations à propos des spécificités des cultures constructives vernaculaires et de leur évolution et diffusion, tandis que celles en génie parasismique fournissent des renseignements sur les facteurs déterminant l'efficacité des procédés qui y étaient associés.

D'un autre côté, compléter ces connaissances relatives à l'environnement construit avec des considérations d'anthropologie culturelle favorise la compréhension des processus sociétaux agissant tant sur la vulnérabilité du bâti que sur la vulnérabilité sociale.

L'approche d'étude adoptée dans le cadre de ce travail en thèse présente à cet égard un intérêt tout particulier.

Les éléments émergeant de cette recherche démontrent le potentiel présenté par une approche questionnant simultanément des aspects relatifs à l'ordre de la perception, de la technique et de la connaissance. Le décryptage du lien entre l'architecture vernaculaire et le *facteur séisme*, comme entre déterminants culturels, types de structures et ressources cognitives parasismiques, se révèle de fait une source remarquable d'éléments concrets et contextuels à partir desquels concevoir des stratégies de résilience multi- et transdisciplinaires, caractère essentiel pour le développement et la diffusion de cultures sismiques collectivement partagées et techniquement appropriées. Relier les aspects culturels (définissant le niveau de sensibilité sismique des individus et des collectivités) à des questions d'ordre structurel (référées à l'efficacité sismique des mesures constructives adoptées) et d'ordre cognitif (soit les savoirs et savoir-faire relatifs aux procédés constructifs parasismiques) favorise non seulement la reconnaissance des réponses qui ont été apportées au cours des siècles, mais également l'élaboration de nouvelles solutions adaptées aux modes de vie contemporains.

Dans le passé comme de nos jours, une forte articulation entre les facteurs culturels, structurels et cognitifs se rapportant au phénomène sismique, constitue le gage d'une bonne interaction entre l'acte de bâtir, compris comme le processus de création d'habitats sains, beaux et sûrs, et l'environnement naturel, dans lequel ce même processus s'élabore et se précise au fil du temps.

Les méthodes et les outils d'investigation, d'observation et d'analyse proposés tout au long de cette recherche présentent, toutefois, certaines limites quant à une appréciation de la vulnérabilité effective des architectures vernaculaires, du fait de la complexité des thématiques abordées. Celle-ci est à rapporter notamment à l'hétérogénéité structurelle et matérielle du bâti induisant une difficulté accrue dans la compréhension de ses réactions lorsqu'il est soumis aux secousses sismiques.

Néanmoins, l'examen du bâti ancien des zones assujetties aux tremblements de terre suivant une démarche située aux interfaces de plusieurs disciplines, entre les sciences de l'ingénieur, l'architecture et les sciences humaines et sociales, a l'avantage d'encourager et de favoriser une compréhension améliorée des cultures vernaculaires. L'ensemble des éléments concourant, d'une manière ou d'une autre, à la réduction de la vulnérabilité, sociale et physique, s'étofferait au fur et à mesure d'un tel décryptage ; la synergie entre le processus d'introspection des patrimoines culturels bâtis et les moyens de renforcement de la résilience des milieux humains et des environnements construits contemporains, en serait enrichie.

ANNEXES

ANNEXE 1 : THÉMATIQUES ABORDÉES PENDANT LES ENTRETIENS AVEC LA POPULATION	244
ANNEXE 2 : CRITÈRES CONSIDÉRÉS DANS L'EXAMEN DU BÂTI VERNACULAIRE	245
2.1. CRITÈRES POUR L'ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES DU BÂTI	
2.2. CRITÈRES POUR L'ANALYSE DES EFFETS SISMQUES SUR LE BÂTI	
ANNEXE 3 : ARTICLE PRÉSENTÉ À <i>CIAV 2013 ANNUAL CONFERENCE FROM THE INTERNATIONAL COMMITTEE OF VERNACULAR ARCHITECTURE OF ICOMOS</i> , 16-20 OCTOBRE 2013, VILA NOVA DE CERVEIRA, PORTUGAL	248

ANNEXE 1 : THÉMATIQUES ABORDÉES PENDANT LES ENTRETIENS AVEC LA POPULATION

Thématiques principales

- Performance sismique du bâti vernaculaire
- Prise en considération du risque sismique dans les cultures constructives vernaculaires
- Rôle structurel des éléments constructifs caractérisant le bâti vernaculaire
- Niveau d'attention porté aux spécificités du bâti vernaculaire dans la pratique constructive contemporaine

Quatre constats de référence

- Les architectures vernaculaires qui ont survécu au tremblement de terre ont résisté de manière inattendue.
D'accord / Pas d'accord / Ni d'accord ni en désaccord
=> Pourquoi ?
- Les sociétés anciennes prenaient en considération le phénomène sismique dans la réalisation de leur environnement bâti.
D'accord / Pas d'accord / Ni d'accord ni en désaccord
=> Si d'accord, comment ?
=> Si pas d'accord, pourquoi ?
- Les bâtisseurs vernaculaires ont développé et mis en œuvre des mesures constructives qui améliorent la performance sismique des ouvrages.
D'accord / Pas d'accord / Ni d'accord ni en désaccord
=> Si d'accord, les quelles ?
- Les particularités du bâti vernaculaire ne sont pas prises en compte dans la pratique constructive contemporaine.
D'accord / Pas d'accord / Ni d'accord ni en désaccord
=> Si d'accord, pourquoi ?
=> Si pas d'accord, comment ?

Autres thématiques

- Sismicité historique locale (grands séismes du passé et événements sismiques récents)
- Corrélation entre les particularités du bâti vernaculaire et l'activité sismique
- Effets induits par les tremblements de terre sur le bâti vernaculaire et sur les ouvrages plus récents
- Transmission de connaissances relatives à l'histoire sismique des lieux
- Comportement de la population pendant les secousses et les séquences sismiques
- Perception du risque sismique au sein de la population
- Gestion institutionnelle du risque sismique

ANNEXE 2 : CRITÈRES CONSIDÉRÉS DANS L'EXAMEN DU BÂTI VERNACULAIRE

ANNEXE 2.1. CRITÈRES POUR L'ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES DU BÂTI

Données générales

- Configuration de l'ouvrage (forme et dimensions)
- Nombre de niveaux
- Type de sol (dur, souple)
- Transformations architecturales et/ou structurales récentes (restauration, rénovation, réparation, consolidation, extension)

Système porteur vertical

- Murs en maçonnerie :
 - => type de maçonnerie (pierres de taille, moellons, briques de terre crue)
 - => type de mortier (terre, chaux, ciment)
 - => type d'appareillage (disposition régulière des unités dans toute l'épaisseur, double mur avec blocage, moellons avec verrouillage, pierres en boutisses traversantes)
 - => liaison entre murs orthogonaux (avec ou sans chaînes d'angle en pierre de taille)
 - => épaisseur
 - => élancement (rapport hauteur libre entre planchers - épaisseur)
- Parois à ossature bois :
 - => emplacement des montants composant la structure primaire (cellule élémentaire)
 - => type de contreventement (croix de St. André, diagonales isolées, etc.)
 - => type d'assemblage entre montants, soles hautes et basses, traverses et diagonales (par entaille, à tenon et mortaise, etc.)
 - => matière du remplissage (pierre, terre crue, terre cuite, bois)
 - => technique de mise en œuvre du remplissage (maçonnerie, en vrac, avec une structure en bois secondaire)
 - => épaisseur
 - => élancement (rapport hauteur libre entre planchers - épaisseur)
- Lien entre sol et superstructure :
 - => technique et matière (soubassement en maçonnerie de pierre, surélévation en ossature bois, etc.)
 - => épaisseur
 - => hauteur hors sol
 - => profondeur dans le sol

Système porteur horizontal

- Plancher
 - => éléments du système (solives, entretoises, etc.)
 - => liaison avec le système porteur vertical
- Toiture
 - => éléments du système (ferme, entrants, chevrons, etc.)
 - => liaison avec le système porteur vertical

Facteurs diminuant la résistance sismique

- Phénomènes naturels affaiblissant la résistance globale de la structure : secousses sismiques (fissuration, désolidarisation des murs, etc.) ; pourrissement du bois et/ou attaques d'insectes, de bactéries et de champignons ; rouille des pièces métalliques (clous, feuilletts, etc.) ; érosion des briques et/ou du mortier de terre ; etc.
- Activités humaines affaiblissant la résistance globale de la structure : transformations structurellement inappropriées, utilisation de nouveaux matériaux incompatibles avec ceux en place, manque d'entretien, etc.

Facteurs augmentant la résistance sismique

- Mesures constructives mises en place par les bâtisseurs vernaculaires au moment de la réalisation de l'ouvrage, ou par la suite, pour améliorer son comportement sismique : tirants ; contreforts ; insertions horizontales assurant le rôle de chaînage ; joints résistants à la traction ; etc.

ANNEXE 2.2. CRITÈRES POUR L'ANALYSE DES EFFETS SISMQUES SUR LE BÂTI

Paramètres généraux relatifs aux dégâts sismiques possibles

- Renversement du système porteur vertical
 - => chute de portions de la maçonnerie
 - => chute de panneaux de remplissage des ossatures
- Fissuration du système porteur vertical
 - => orientation des fissures (horizontale, verticale, en biais, diagonale, en forme de X)
 - => endroit des fissures (joints d'assise de la maçonnerie, intersection de murs perpendiculaires, angles des ouvertures, etc.)
- Fissuration dans l'enduit extérieur et/ou intérieur
 - => fissures capillaires
 - => fissures de dimension constante
 - => fissures avec une dimension variable
- Séparation totale ou partielle des murs/parois perpendiculaires
- Déconnexion totale ou partielle entre le système porteur vertical et les systèmes porteurs horizontaux (plancher et/ou toiture)
- Relâchement des assemblages entre les éléments en bois
- Effet de martèlement entre deux structures adjacentes
- Chute d'éléments constructifs ou architecturaux (cheminées, balcons, corniches, etc.)

Critères complémentaires et questions spécifiques au procédé constructif basé sur l'intégration d'éléments horizontaux en bois en forme d'échelle dans les murs en maçonnerie

- Dimension des tasseaux de bois composant les insertions
 - => sont-ils suffisamment rigides pour maintenir en place la maçonnerie en cas de défaillances dans les parties sous-jacentes ?
- Liaison d'angle des insertions
 - => permet-elle de prévenir la séparation des murs perpendiculaires ?
 - => est-elle réalisée de manière que les insertions puissent transmettre les charges aux murs parallèles aux sollicitations ?
- Cohésion transversale des insertions
 - => permet-elle d'accroître la liaison entre les couches verticales du mur, surtout en cas d'absence de pierres en boutisses traversantes ?
- Raccordement longitudinal des insertions
 - => assure-t-il une bonne tenue face aux forces en traction ?
- Emplacement des insertions dans le plan vertical
 - => sont-elles disposées de manière à réduire le risque de renversement de la maçonnerie ?
 - => permettent-elles d'améliorer l'ancrage des murs au plancher et à la toiture ?

ANNEXE 3 : ARTICLE PRÉSENTÉ À CIAV 2013 ANNUAL CONFERENCE FROM THE INTERNATIONAL COMMITTEE OF VERNACULAR ARCHITECTURE OF ICOMOS, 16-20 OCTOBRE 2013, VILA NOVA DE CERVEIRA, PORTUGAL

Publié dans : Correia, M., Carlos, G. & Rocha, S. éd., 2014. *Vernacular heritage and earthen architecture. Contributions for sustainable development*. Londres : Taylor & Francis Group, p. 703-709.

Learning from vernacular building practices: A starting point for risk mitigation

A. Caimi

CRAterre, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, Grenoble, France

M. Hofmann

Archives of Modern Building, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland

ABSTRACT: In most natural disaster prone areas, vernacular builders have implemented affordable strategies that have proven to perform adequately during natural hazards. Learning from these practices represents a great potential to further strengthen the resilience of contemporary societies dealing with these risks. This paper presents an approach for the identification and the valorisation of disaster resilient local building practices, based on two methodologies developed for the analysis of vernacular building cultures in risk prone areas. One focuses on issues concerning the exploration of vernacular architecture seismic performance; the other explores the relation between building technical features and factors influencing the resilience of communities living in areas affected by various types of natural hazards. This combined approach aims to explore and to put forward ways to further benefit from the inventiveness inherent to vernacular building cultures, in order to pragmatically contribute to the vulnerability reduction process of present-day built environments.

1 LEARNING FROM VERNACULAR IN HAZARD-PRONE AREAS

In most natural disaster prone areas, vernacular builders have implemented building strategies that are affordable in relation to local resources, and that perform well in relation to natural phenomena affecting the region. Learning from vernacular practices is not a new idea, as witnessed by their evolution over the centuries. Even today, this learning process represents a great potential to further strengthen the resilience of contemporary societies dealing with natural hazards.

This paper presents an approach for the identification and the valorisation of disaster resilient local building practices existing among vernacular cultures, based on two different, but complementary methodologies developed within the framework of two doctoral theses—one at the ACM-EPFL laboratory and the other at the CRAterre-ENSAG laboratory. One methodology investigates the seismic performance of vernacular architecture mixing wood, earth and stone. The other method links building technical features to natural, socio-economic and cultural factors that influence the built environment and the resilience of communities, who live in areas affected by various types of natural hazards.

The peculiarities of the methodologies developed—and their respective benefits—are explained

on the basis of two field studies in Balkan and Anatolian seismic regions and of an on-going vulnerability reduction programme in Bangladesh.

The global idea of this approach is to explore and to put forward ways to further benefit from the inventiveness inherent to vernacular building cultures, in order to pragmatically contribute to the vulnerability reduction process of present-day built environments.

2 VERNACULAR ARCHITECTURE INVESTIGATION IN SEISMIC AREAS

A large part of the built environment in areas prone to natural hazards consists of vernacular buildings, implemented with techniques empirically developed during centuries, and using mainly natural materials. Building techniques elaborated by vernacular builders are of several types. Some have proven to perform adequately during destructive natural hazards (Langenbach 2009). Nowadays, investigating these vernacular practices is useful for various reasons. They become a source of technological inspiration for new contemporary architecture, and for post-disaster reconstruction projects as well (Schacher 2008). In heritage conservation, a deeper knowledge of these practices helps stakeholders to prevent—in an accessible manner—natural and

human phenomena that can dangerously reduce the structural performance of existing buildings (Şahin Güçhan 2007). Investigating factors that influence the vulnerability of the built environment is important in earthquake prone areas, especially in relation to the unpredictability and the amount of destruction that this type of hazard can suddenly induce. Due to the heterogeneity of vernacular architectures—in their materials and techniques, it is necessary to investigate their vulnerability by combining data collected before and after earthquakes, related to each existing vernacular building typology. Here, the explored typology is characterized by load bearing—stones or adobes—masonry walls, combined with horizontal timber elements (Sumanov 2003).

This wall typology differs from others (e.g. infill timber frame structure), because, until nowadays, it has been recorded only in the vernacular architecture of seismic areas. This is especially the case for the geographical area named Alpide Belt: a large territory extending along the southern margin of Eurasia, from Morocco to Indonesia, through the Apennines, Anatolia and Himalaya. Issues related to its investigation are mentioned, referring to two fieldworks implemented along the North Anatolian Fault Zone (in the Republic of Turkey), and in the region north of Ohrid Lake (in the Republic of Macedonia).

In the territory along the North Anatolian Fault, this typology has been found with more or less constant occurrence in various locations. On the basis of the vernacular architecture found on the sites that have been visited—which can be regrouped in West, Centre-West, Centre-East and East regions in relation to the North Anatolian Fault Zone—some remarks about its use and its technical features can be formulated.

Generally, the typology is commonly used in West and Centre-West regions, where it can take various forms and it is seen in buildings regardless their function. In places visited in the Centre-East region—the cities of Sivas, Tokat and Niksar—its use is limited, and most vernacular buildings have an infill timber frame structure. In the East region, this wall typology is widespread in the old settlement of Erzurum city. Differently from almost all other sites visited—where it has been employed mainly for the lower part of the buildings (Fig. 1a)—in Erzurum, this particular typology, has been implemented for the whole building (Fig. 1b).

Through the analysis of architectures corresponding to the same typology, but located in areas with different levels of seismicity (in terms of Severity and Recurrence), specific building variants can be recognised.

In the regions where strong earthquakes historically occurred, the horizontal timber elements embedded into the wall have a ladder-like form. In



Figure 1. (a) Sölöz Village in Western region of the North Anatolian Fault Zone (Republic of Turkey). Credits: M. Hofmann. (b) Erzurum City in Eastern region of the North Anatolian Fault Zone (Republic of Turkey). Credits: M. Hofmann.

this case, two longitudinal timber beams (10–15 cm thick) are placed in the wall section—one on the inner, and the other on the outer face—and are connected by cross pieces every 60–80 cm. The vertical spacing between these horizontal elements can vary to some extent in the same city or village, but the difference is more visible by comparing buildings located in different places. In Erzurum—where five earthquakes of a magnitude greater than 5.5 have been registered during the twentieth century, with epicentres very close to this city—the vertical interval is predominantly about 40–80 cm. On the other hand, in the historically slightly less seismic city of Tokat (Centre-East region), the spacing can measure up to 150 cm. Despite this observation, it is difficult to assert that there is a direct relation between the height of spacing and local seismic activity. However, one cannot exclude that it represents a factor that was carefully taken into consideration by the builders. It is interesting to note that, on sites where earthquakes occurred with a higher recurrence, some buildings have a halved joint, with double dovetail at the intersection of perpendicular walls (Fig. 2a). This type of timber connection differs from the more ordinary halved corner joint found in almost all sites (Fig. 2b).

In some sites that have been affected by earthquakes with not too much severity, vernacular builders have implemented an alternative type of horizontal element embedded into masonry walls. For example, in the city of Safranbolu—where the epicentres of the six earthquakes with a magnitude greater than 5.5, which occurred during the twentieth century, are situated within a 100 km radius—wooden planks have been horizontally laid inside the wall in such a way as to cover the whole thickness of the masonry. Generally, the thickness of these planks measures 1–4 cm; in some very rare cases, the horizontal wooden elements are so thin—about 1 mm thick—that they are not easily recognisable between the masonry blocks. When wooden planks are used, the vertical spacing is



Figure 2. (a) Special halved corner joint with double dovetail in Erzurum City (Republic of Turkey). Credits: M. Hofmann. (b) Ordinary halved corner joint in Cumahkızık Village (Republic of Turkey). Credits: M. Hofmann.

much less regular than in those cases where ladder-like form elements are employed, and it can vary between 80 and 200 cm.

Through the reconnaissance of regional building particularities—from the masonry wall type to the type of wooden binding joints—variables of a specific vernacular building typology can be identified. Referring to the wall typology and the regions considered here, the main variables are the masonry materials and the type of bonding, the form of the horizontal elements and their vertical position in the wall, as well as the type of joints binding them together.

Hence, starting from identified building variables, vernacular typologies can be subdivided into various typological sub-types, in order to further specify the investigation. For instance, for the wall typology, whose specific feature is to have wooden horizontal element integrated into load bearing masonry, a detailed sub-type can be defined as follows: double-wall masonry bonds type made of rubble stone combined with ladder-shaped horizontal timber elements.

In order to grasp the nature of the influence that all identified building variables have on the seismic performance of a typological sub-type, the investigation of buildings after an earthquake plays a key role: post-earthquake reconnaissance serves to identify the factors that are likely to increase or to reduce the seismic vulnerability of buildings. In this way, critical—positive or negative—factors related to each building variable can be investigated and hypotheses about the seismic performance of each typological sub-type can be formulated.

A post-earthquake investigation was performed in Beltchichta village in the North area of Ohrid Lake (Republic of Macedonia). The village is situated no more than 10 km away from the epicentre of a moderate 4.5 magnitude earthquake (June 07, 2012; hypocentre 1 km depth). This fieldwork has led to some remarks about the influence of some variables—in this case, the vertical position of horizontal elements and the timber joint types—of



Figure 3a and 3b. Seismic damages on two different buildings in Beltchichta (Republic of Macedonia). Credits: M. Hofmann.

the sub-type mentioned. In some buildings, stones in the masonry walls have been overthrown due to out-of-plane movements (Fig. 3a). This generally occurred in the higher parts of the constructions. This failure mechanism appears to be reduced, when the height of masonry between the two upper horizontal elements is minor, and if the roof rafters are imbedded between two horizontal elements situated at the top of the wall. In rare cases, a disconnection also occurred between horizontal timber elements. This happened mainly in the lower part of the building and in conjunction with weakened nailed plain or half-lap scarf joints. These connections lost their binding efficacy over time, and were unable to support these new seismic forces: previous earthquakes, wood rotting, and nails rusting were the major causes of this new state of vulnerability. Referring to this specific seismic effect, it is interesting to record that in a particular case, a masonry wall cracked vertically exactly where the disconnection occurred (Fig. 3b).

2.1 *Between vernacular experiences and evolving knowledge*

There is a dual interest in highlighting the aspects influencing the vulnerability of vernacular architecture through the investigation of building typologies and their respective typological sub-types. Firstly, it facilitates a structured identification of very specific critical factors likely to be related to seismic risk. Secondly, it fosters a better understanding of the dynamic behaviour of each typological sub-type, allowing for more accurate hypotheses. This investigation method has to be considered as a field-based empirical method, complementary to other research approaches.

When combined with findings that can result from experimental tests, aiming at better understanding vernacular building technologies, the critical factors identified during field investigation, and the ensuing hypotheses about seismic performance can constitute useful references for ordinary architectural practice. Based on the actual behaviour of buildings and experimental research results, these

data could be regrouped into general and/or specific guidelines regarding the specificities of each building typology characterising vernacular architecture, also taking into account the differences that can exist between their local variants.

3 ANALYSIS OF DISASTER RESILIENT VERNACULAR PRACTICES

Although vernacular buildings can be studied as mere artefacts on the one hand; on the other hand they represent one of the most explicit components of the interaction between a community and its environment. Extending the analysis of local building practices in hazard-prone areas beyond the building scale, and exploring the factors that influence and shape construction, can serve to apprehend the various strategies developed by builders and inhabitants of vernacular architectures.

The following information results from analyses conducted in Bangladesh, in the framework of a risk reduction and disaster preparedness programme, jointly implemented by Caritas Bangladesh, the Bangladesh University of Engineering and Technology and the CRAterre laboratory, combining field experience, scientific expertise and technical and methodological support. Through assessment of local building practices in different parts of the country, this programme aims to develop constructive proposals for post-disaster reconstruction and preventive improvement of existing housing, according to the specificities of each different area. These analyses rely on a methodology that has been elaborated through field experiences conducted in different contexts (in Bangladesh as well as in Haiti within the RepairH research project) affected by various types of natural hazards. This methodology is based on a participatory approach (Chambers et al 2004), taking into account, as sources of information, the built environment, but also individuals and groups involved in its design, implementation and maintenance. In fact, builders, artisans and inhabitants are considered as the holders of the knowledge and the information needed to understand the reasons behind certain particular technical solutions. Therefore, in order to identify possible ways to improve local building practices, their direct contribution is essential.

Whereas the characteristics of a region influence the built environment of a community, the latter's aspirations, needs, experiences and know-how shape the construction and architectural features of buildings, based on the materials, resources and capacities locally available. While buildings integrate the physical, social and cultural characteristics of their environment, a great variety of measures has been developed to respond to its potential and constraints. In areas affected

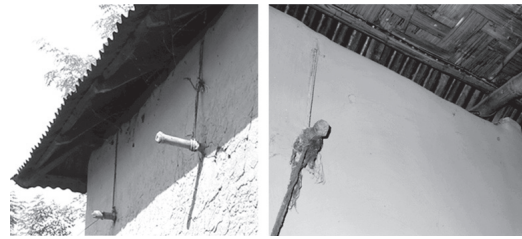


Figure 4a and 4b. Raipur Village (Mymensingh region): permanent anchoring system of the roof structure. Credits: A. Caimi.

by recurrent natural hazards, vernacular builders have conceived a multiplicity of strategies to cope with the risks characterizing their specific environment. These various attempts or solutions may vary not only from hazard to hazard, from region to region, and even between members of the same community, but above all, they include multiple levels, ranging from constructive detail to territorial planning. And sometimes they are related to dimensions that go beyond the strictly technical, corresponding to practice and behaviour (Dekens 2007). In addition to protective measures at the level of the surrounding area (such as a vegetation barrier as protection from high winds or particular plantation to stabilize riverbanks and hillsides), at the building level, different types of devices are used to reduce vulnerability.

Technical measures of a permanent type are integrated into the building since its construction through details and constructive devices that are calibrated to the recurrence and severity, with which natural phenomena locally occur. In Raipur village (Mymensingh region), a minimalist, but very effective solution, reduces the vulnerability of the houses to winds that regularly affect the region. In cob constructions, wall plates are anchored on both sides with jute ropes to pieces of bamboo embedded through the walls, so as to prevent the wrenching of the roof structure (Figs 4a-4b).

In Assassuni sub-district (Khulna region), the annual frequency of particularly strong cyclonic winds has influenced the stumpy shape of the houses, but it has also led their builders to fasten covering tiles to the roof structure, to prevent them from flying off (Fig. 5a). Furthermore, the use of a sacrificial earthen mass at the basement level provides protection against seasonal flooding (Fig. 5b). This kind of arrangement preserves the stability of the bearing structure against erosion affecting the lower part of the building in case of stagnant water or flash floods.

However, technical measures to reduce the vulnerability of buildings may also be momentary and



Figure 5. (a) Gayakhali Village (Khulna region): ropes fasten purlins to bamboos arranged above the tiles, creating a continuous connection with the roof structure. Credits: A. Caimi. (b) Hashkhali Village (Khulna region): local floods influence the double step shape of the plinth: the lower step matches the level of the most frequent floods, limiting possible necessary repairs to this small part; the second step is sized in relation to the level of exceptional floods. Credits: A. Caimi.



Figure 6. (a) Thakurbad Village (Khulna region): at the four corners of the roof, wall plates are connected by ropes to stakes driven into the ground. Credits: A. Caimi. (b) Ujanbarapait Village (Sylhet region): gable roof anchoring system with bamboo arranged above the CGI sheet covering and connected to stakes driven into the ground. Credits: A. Caimi.

temporary. Indeed, they may be implemented just before a foreseeable hazard (e.g. cyclone or flood), and subsequently withdrawn, or they may be implemented using materials and techniques that provide fast replacement with very little (economic and technical) effort without influencing the main structure. For example, various devices are used to reduce roof vulnerability to wind, through fastening to the ground or roof covering stabilization systems. In the villages of Assassuni sub-district, exposed to cyclones with annual frequency, tiled and thatched roofs are covered by fishing nets or bamboo grids, to prevent them from flying off. Furthermore, the roof structure is fastened with ropes to trees or stakes driven into the ground (Fig. 6a). In addition to the permanent anchoring system in cob walls, in Kanaighat sub-district (Sylhet region), a ground anchoring system is also used for gable roofs (Fig. 6b), to prevent the CGI sheet covering from tearing off during storms affecting the area every 3–4 months.

Temporary provisions, apart from being easily implemented by the inhabitants themselves, are also cost-effective solutions to reduce, at least in part, vulnerability to local hazards, especially for those who are not able to afford more efficient or permanent measures (e.g. a hip roof).

In addition to such technical devices, other measures have also been developed, which are more related to a behavioural dimension. Their understanding helps to identify building parts, whose preservation is considered as a priority by the local population, and those solutions considered viable, especially in relation to phenomena whose extent does not permit to adopt stronger, and at the same time financially accessible measures.

In Gaibandha district (Dinajpur region), houses located on the Jamuna River banks are built with very light materials (bamboo poles, GCI sheets, jute stick fences) and a closed platform occupies one third of their surface. During annual floods, the platform provides a safe shelter for people and goods. However, during exceptional floods, occurring every 2–3 years, people dismantle their houses and temporarily move them to a safer place (embankment, inland). These buildings are therefore designed to be quickly and easily disassembled, moved and reassembled by the inhabitants themselves.

Especially in the case of “living” practices, still developed and implemented today, these findings highlight the need to rely on heterogeneous sources of information in order to understand the facts, but also their reasons, mechanisms and potentials. Comparing different experiences, knowledge and know-how can lead to identify solutions that are not visible otherwise, either because they are implemented only at a particular moment, or because they are located in hidden parts of the building.

In Satkhira area (Khulna region), constructive devices developed in response to specific problems, as well as their particular function, have been identified thanks to the discussion with local inhabitants and artisans. According to the local population, bamboo slices are horizontally embedded into the mass of cob walls to reduce wall cracking, due to a differential settlement of soil induced by flash floods or stagnant water.

In the interrelation between a region’s local architecture and natural hazards, factors influencing the built and living environment of a community are closely intertwined with prevention,



Figure 7. Raipur Village (Mymensingh region): the walls act as an independent box: if damaged, the roof is preserved, providing shelter to the people and limiting the extent and complexity of repairs. Credits: A. Caimi.

preparation and recovery strategies, developed by the latter in relation to locally recurrent risks. Analysing a community's building practices can help to identify the factors that influence their evolution, but it also leads to discover original solutions for new proposals that consider the vulnerability reduction issue, as well as the various constraints faced by the local population.

In Dobhaura sub-district (Mymensingh region), due to increasingly frequent and intense floods, cob construction has been replaced with lighter structures (bamboo poles and CGI sheet fences). However, the use of these materials requires an economic investment, which some parts of the population cannot afford. Following the August 2012 floods, earthen housing repairs carried out by some people are of particular interest and relevance: bamboo poles were added as a roof bearing structure, independent from earthen walls that could collapse during floods (Fig. 7). The value of this solution lies in the combination of very cheap and locally available materials with a building system, which preserves the most expensive parts of the building (generally, the roof), while protecting the inhabitants and enabling them to quickly repair their home, if damaged.

3.1 *Between vernacular strategies and local capacity building*

The results of such an analysis highlight the variety and relevance of solutions developed by local people in relation to each particular environment. However, they also bring out the need to integrate this diversity into methodological and constructive proposals, aiming to enhance local resilience capacities. In a post-disaster phase, as well as in

preparedness and prevention activities, such an analysis provides the basis for a diversification of solutions to improve local technologies, proposing a range of options tailored to different socio-cultural situations, and investment capacities, as well as to local potential and constraints.

Strategies developed by vernacular builders often represent a balance between skills, resources and risks, and they are indicative of the level of vulnerability accepted by the inhabitants in relation to these factors. Identifying, understanding and taking into account these strategies can be extremely valuable in the process of building resilience through habitat sector.

4 KEY ISSUES

Combining the analysis of building particularities with the understanding of the contextual dynamics is thus, an essential process in order to recognize and determine on which technical and societal aspects contemporary vulnerability reduction activities have to be based. Some issues arise regarding the involvement of vernacular building culture in architectural practice.

How can disaster-resilient knowledge, associated to empirical building practices, be largely disseminated simultaneously—and complementarily—to the diffusion of scientific knowledge?

How can contemporary societies comprehend the technical aspects of vernacular architecture, even if its building techniques are no longer implemented, and the inherent knowledge transmission is no more assured in-between generation?

And finally, which role can architects play in the interaction between ordinary building practices and disaster resilient vernacular building knowledge, in order to strengthen the vulnerability reduction process, while transforming existing architectural environments or creating new ones?

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to express our gratefulness to the Ecole PolyTechnique Fédérale de Lausanne and the French National Agency for Research (within the framework of RepairH project) for funding these researches, as well as to Prof. Pierre Frey (EPFL-ENAC-IA-ACM) and Prof. Hubert Guillaud (CRAtterre-ENSAG) for their follow up, Mr Olivier Moles (CRAtterre-ENSAG), Mr Ratan Kumar Podder (Caritas Bangladesh), Dr Mohammed Shariful Islam and Prof Tashin Resa Hossain (Bangladesh University of Engineering and Technology), for their contribution to our reflections.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdessemed Foufa, A. & Benouar, D., 2006. Les techniques constructives sismo résistantes dans la Casbah d'Alger. *Vies de Villes*, (5), p.57-61.
- Abdessemed Foufa, A. & Benouar, D., 2008. Investigation of the 1716 Algiers (Algeria) earthquake and the traditional seismic preventive measures from historical documents sources. Dans The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12-17 octobre 2008, Pékin (Chine).
- Abdessemed Foufa, A. & Benouar, D., 2010. Investigation of the 1716 Algiers (Algeria) earthquake from historical sources. Effect, damages, and vulnerability. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(3), p.270-293.
- Ahunbay, A.Z. et al., 2014. Saving Cumalıkızık for the future. Cultural heritage in Turkey. Dans M. Correia, G. Carlos, & S. Rocha, éd. *Vernacular heritage and earthen architecture. Contributions for sustainable development*. Londres : Taylor & Francis Group, p. 567-572.
- Alexander, D.E., 2010. The L'Aquila earthquake of 6 april 2009 and italian government policy on disaster response. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 2(4), p.325-342.
- Amato, A. & Galadini, F., 2013. Gli argomenti della scienza nel processo dell'Aquila alla « commissione grandi rischi ». *Analysis. Rivista di cultura e politica scientifica*, (3-4), p.1-37.
- Anger, R., 2011. *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France).
- Anger, R. & Fontaine, L., 2009. *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*, Paris : Belin.
- Antonini, O., 2010. L'Aquila e i terremoti. Storia di distruzioni e di ricostruzioni : come nel 1703 si affrontò il post-sisma. *Abruzzo 24 ore*. Disponible sur : www.abruzzo24ore.tv/news/L-Aquila-e-i-terremoti-storia-di-distruzioni-e-di-ricostruzioni/19708.htm.
- Arya, A.S., 2000. Non-engineered construction in developing countries. An approach toward earthquake risk reduction. Dans The 12th World Conference on Earthquake Engineering, 30 janvier - 4 février 2000, Auckland (Nouvelle-Zélande).
- Arya, A.S., Boen, T. & Ishiyama, Y., 2012. *Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction* Final draft for revision, International Association for Earthquake Engineering, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Institute of Seismology & Earthquake Engineering. Disponible sur : <http://iisee.kenken.go.jp/net/members/iaee/NonEngMainA4Er.pdf>.
- Asquith, L. & Vellinga, M. éd., 2006. *Vernacular architecture in the twenty-first century. Theory, education and practice*, Oxon : Taylor & Francis.
- Aytun, A., 1981. Earthen buildings in seismic areas of Turkey. Dans G. W. May, éd. *Proceedings of International Workshop Earthen Buildings in Seismic Area, may 24-28, 1981, Albuquerque, New Mexico, United States*. Albuquerque : University of New Mexico, p. 345-372.
- Balandier, P., 2004. Sismologie appliquée. Dans P. Balandier & M. Zacek, éd. *Conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie*. Coll. conception parasismique. Villefontaine : Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau.
- Barrué-Pastor, M. & Barrué, M., 1998. Mémoire des catastrophes, gestion des risques et architecture paysanne en montagne. L'exemple des vallées du Haut-Lavedan dans les Pyrénées centrales françaises. *Revue de géographie alpine*, 86(2), p.25-36.
- Barucci, C., 1990. *La casa antisismica. Prototipi e brevetti : materiali per una storia delle tecniche e del cantiere*, Rome : Gangemi.
- Bazzurro, P. et al., 2009. *The Mw 6.3 Abruzzo, Italy, earthquake of april 6, 2009*, Earthquake Engineering Research Institute, Applied Technology Council, Pacific Earthquake Engineering Research Center. Disponible sur : www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2009_pdf/LAquila-eq-report.pdf.
- Bento, R., Lopes, M. & Cardoso, R., 2005. Seismic evaluation of old masonry buildings. Part II : analysis of strengthening solutions for a case study. *Engineering Structures*, 27(14), p.2014-2023.

- Bhargava, N. et al., 2009. Earthquake prediction through animal behavior. A review. *Indian Journal of Biomechanics: Special Issue*, p.159-165.
- Bianca, S. et al., 2005. *Conservation and development in Hunza and Baltistan*, Lausanne : Aga Khan Trust For Culture.
- Bianca, S. éd., 2005. *Karakoram. Hidden treasures in the Northern areas of Pakistan*, Turin : Umberto Allemandi & Co, Aga Khan Trust for Culture.
- Bianco, A., Esposito, A. & Tuzza, S., 2007. Le indagini non distruttive come strumento investigativo per la conoscenza delle tecniche costruttive dell'edilizia storica del '900. Il caso-studio di Reggio Calabria. Dans 10^a Conferenza nazionale sulle prove non distruttive, monitoraggio e diagnostica, 11-13 octobre 2007, Milan (Italie).
- Billi, M., 2013. *Sentenza 380/2012 del tribunale di L'Aquila, sezione penale*.
- Binda, L., 2000. *Caratterizzazione delle murature in pietra e mattoni ai fini dell'individuazione di opportune tecniche di riparazione*, Rome : Consiglio Nazionale delle Ricerche & Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.
- Blondet, M. et al., 2003. *Earthquake-resistant construction of adobe buildings. A tutorial* Deuxième, Oakland : Earthquake Engineering Research Institute.
- Bochud, M., Waeber, G. & Vollenweider, P., 2009. Anamnèse familiale. Utile ou futile ? *Revue Médicale Suisse*, (188).
- Boen, T. & Pribadi, K.S., 2009. Engineering the non engineered houses for better earthquake resistance in Indonesia. Disponible sur : <http://drh.bosai.go.jp/database/item/6cc5597e09050a9b482d9f257c5f256ec28f6e50>.
- Le Bon, G., 1895. *Psychologie des foules*, Paris : Presses universitaires de France.
- Borda d'Água, F. & Jacob, F., 2007. Pourquoi ? Vers une nouvelle lecture du tremblement de terre de Lisbonne. Dans C. Delécraz & L. Durussel, éd. *Scénario catastrophe*. Genève : Infolio & Musée d'Ethnographie.
- Bothara, J. & Brzev, S., 2011. *A tutorial. Improving the seismic performance of stone masonry buildings*, Oakland : Earthquake Engineering Research Institute.
- Brezovski, S., 1993. *Rekanska Kuja*, Skopje : Biggos.
- Bromberger, C., 1974. Habitations du Gilân. *Objets et mondes*, 14(1), p.3-56.
- Brzev, S., 2007. *Earthquake-resistant confined masonry construction*, Kanpur : National Information Center of Earthquake Engineering.
- Bullen, F., Boyce, B. & Fidler, C., 1992. *The design and performance of measures segmental concrete crib retaining walls*, Brisbane : Physical Infrastructure Centre, Queensland University of Technology.
- Caimi, A., 2014. *Cultures constructives vernaculaires et résilience. Entre savoir, pratique et technique: appréhender le vernaculaire en tant que génie du lieu et génie parasinistre*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble (France).
- Cangi, G., 2005. *Manuale del recupero strutturale e antisismico*, Rome : Tipografia del genio civile.
- Cannon, T., 1994. Vulnerability analysis and the explanation of « natural » disasters. Dans A. Varley, éd. *Disasters, development and environment*. Chichester, New York : Wiley, p. 13-30.
- Cannon, T., 2008. Vulnerability, « innocent » disasters and the imperative of cultural understanding. *Disaster Prevention and Management*, 17(3), p.350-357.
- Cao, Z. & Watanabe, H., 2004. Earthquake response predication and retrofitting techniques of adobe structures. Dans The 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1-6 août 2004, Vancouver (Canada).
- Capra, F., 2004. *La scienza della vita. Le connessioni nascoste fra la natura e gli esseri viventi*, Milan : Rizzoli.
- Cardoso, R., Lopes, M. & Bento, R., 2004. Earthquake resistant structures of portuguese old « pombalino » buildings. Dans The 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1-6 août 2004, Vancouver (Canada).

- Carocci, C.F., 2001. Guidelines for the safety and preservation of historical centres in seismic areas. Dans The 3rd International Seminar Historical Constructions 2001, Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, 7-8-9 novembre 2001, Guimarães (Portugal).
- Casanovas, X. et al., 2002. *Architecture traditionnelle méditerranéenne*, Barcelone : Corpus-Euromed Heritage.
- Casanovas, X., 2007. *Méthode RehabiMed. Architecture traditionnelle méditerranéenne*, Barcelone : RehabiMed.
- Castelli, V. & Camassi, R., 2007. A che santo votarsi. L'influsso dei grandi terremoti del 1703 sulla cultura popolare. Dans R. Colapietra, G. Marinangeli, & P. Muzi, éd. *Settecento abruzzese. Eventi sismici, mutamenti economico-sociali e ricerca storiografica. Atti del convegno L'Aquila 29-30-31 ottobre 2004*. L'Aquila : Colacchi, p. 107-130.
- Cataldi, G., 1986. *All'origine dell'abitare. (Catalogo della) mostra itinerante : Firenze, 15 ottobre - 15 novembre 1986*, Florence : Alinea.
- Chester, D.K. & Duncan, A.M., 2009. The bible, theodicy and christian responses to historic and contemporary earthquakes and volcanic eruptions. *Environmental Hazards*, 8(4), p.304-332.
- Chianello, G.M., Raschi, R. & Rebuffat, M., 2009. *Manuale per la compilazione della scheda di 1 livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)*, Rome : Dipartimento della Protezione Civile.
- Choisy, A., 1883. *L'art de bâtir chez les byzantins*, Paris : Librairie de la Société Anonyme de Publications.
- Choisy, A., 1899. *Histoire de l'architecture*, Paris : Gauthier-Villars.
- Ciccozzi, A., 2013. *Parola di scienza. Il terremoto dell'Aquila e la commissione grandi rischi : un'analisi antropologica*, Rome : DeriveApprodi.
- Cifani, G. et al., 2009. Sisma Abruzzo 6 aprile 2009. Attività ITC per la salvaguardia dei beni culturali. *Edilizia*, (161), p.37-47.
- Cinti, F.R. et al., 2011. Evidence for surface faulting events along the Paganica fault prior to the 6 april 2009 L'Aquila earthquake (central Italy). *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 116(B7).
- Coburn, A. & Spence, R., 1987a. Earthquake protection. An international task for the 1990s. *The Structural Engineer*, 65A(8), p.290-296.
- Coburn, A. & Spence, R., 1987b. *Reducing earthquake losses in rural areas. A case study of Eastern Turkey*, Rapport de recherche, Université de Cambridge (Angleterre).
- Coburn, A. & Spence, R., 1992. *Earthquake protection* Deuxième, Chichester : Wiley.
- Coburn, A., 1993. Introduction of a vulnerability assessment system to development planning. Dans *Proceedings of the IDNDR Aichi/Nagoya International Conference 1993 Japan, november 1-4, 1993, Nagoya, Japan*. Nagoya : United Nations Centre for Regional Development, p. 261-270.
- Correia, M., 2002. Preliminary report of the local seismic culture in Portugal. Dans *Taversism Project - Atlas of Local Seismic Cultures*. European Research Project. Ravello : Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali.
- Crocker, E., 2000. Earthen architecture and seismic codes. Lessons from the field. Dans The International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, 16-18 novembre 2000, Istanbul (Turquie).
- D'Antonio, M., 2013. *Ita terraemotus damna impedire. Note sulle tecniche antisismiche storiche in Abruzzo*, Gorgonzola : Carsa Edizioni.
- Davis, H., 1999. *The culture of building*, New York : Oxford University Press.
- D'Ayala, D. et al., 1997. Earthquake loss estimation for Europe's historic town centres. *Earthquake Spectra*, 13(4), p.773-793.
- D'Ayala, D. et al., 2003. *The Kocaeli, Turkey earthquake of 17 august 1999. A field report by EEFIT*, Londres : Earthquake Engineering Field Investigation Team.

- Dazio, A. et al., 2009. *Das Mw=6.3 Erdbeben von L'Aquila am 6. April 2009. Bericht der SGEB-Erkundungsmission vom 15.-18. April 2009*, Zurich : Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures.
- Decanini, L. et al., 2004. Performance of masonry buildings during the 2002 Molise, Italy, earthquake. *Earthquake Spectra*, 20(S1), p.191-220.
- Demosthenous, M. & Makarios, T., 2006. Seismic response of traditional buildings of Lefkas island, Greece. *Engineering Structures*, 28(2), p.264-278.
- Devaux, M., 2008. *Seismic vulnerability of cultural heritage buildings in Switzerland*. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse).
- Diamond, J.M., 2009. *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Paris : Gallimard.
- Dikmen, N., 2010. An Investigation on traditional timber-framed buildings in Çankiri province of Turkey. *Trakya Üniversitesi Journal of Science*, 11(1), p.15-27.
- Doğangün, A. et al., 2006. Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 13(6), p.981-996.
- Dogliani, F. & Angeletti, P., 1994. *Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*, Trieste : Lint.
- Dogliani, F., 2000. Codice di pratica (linee guida) per la progettazione degli interventi di riparazione, miglioramento sismico e restauro dei beni architettonici danneggiati dal terremoto umbro-marchigiano del 1997. *Bollettino Ufficiale Regione Marche*, (15).
- Dolce, M. & Martinelli, A. éd., 2005. *Inventario e vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia centro-meridionale (progetto SAVE)*, L'Aquila : Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia & Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.
- Dufour, L. & Raymond, H., 1992. *1693 Val di Noto. La rinascita dopo il disastro*, Catane : Domenico Sanfilippo.
- Ece Ferah, F., 2009. *1755 Lisbon earthquake and protection of cultural heritage from future earthquakes. With a comparative study about earthquakes and risk preparedness in Istanbul*. Thèse de Master, Université de Minho (Portugal) & Université Polytechnique de Catalogne (Espagne).
- Edelberg, L. & Jones, S., 1979. *Nuristan*, Graz : Akademische Druck - u. Verlagsanstalt.
- Edelberg, L., 1984. *Nuristani buildings*, Aarhus : Jysk arkæologisk selskab.
- ElGawady, M., Lestuzzi, P. & Badoux, M., 2004. A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM. Dans The 13th International Brick and Block Masonry Conference, 4-7 juillet 2004, Amsterdam (Pays-Bas).
- Ellsworth, W.L., 2013. Injection-induced earthquakes. *Science*, 341(6142), p.1225942.
- Er Akan, A., 2004. *Some observations on the seismic behaviour of traditional timber structures in Turkey*. Thèse de Master, Université Technique du Moyen-Orient (Turquie).
- Erdogan, N., Özbayraktar, M. & Ayyildiz, S., 2011. *Tarihi Izmit kent merkezi geleneksel konutlari*, Istanbul: Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayinlari.
- ERRA, 2011. *2005 Pakistan earthquake housing reconstruction*, Pakistan : Earthquake Reconstruction and Rehabilitation Authority.
- Fabrizio, A., 1933. *I terremoti e i diversi sistemi di costruzioni antisismiche*, Benevento : Proprietà letteraria.
- Fässler, A., 2002. La naissance de la solidarité confédérale. Les actions d'entraide suite à l'éboulement de Goldau (1806). Dans C. Pfister, éd. *Le jour d'après. Surmonter les catastrophes naturelles : le cas de la Suisse entre 1500 et 2000*. Berne : Haupt, p. 55-68.
- Fässler, M., 2002. Les grands incendies. Des cas d'école pour la gestion des catastrophes. Dans C. Pfister, éd. *Le jour d'après. Surmonter les catastrophes naturelles : le cas de la Suisse entre 1500 et 2000*. Berne : Haupt, p. 177-190.

- FEMA, 2002. *FEMA 154. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards. A handbook*, Washington : National Earthquake Hazards Reduction Program, Applied Technology Council & Federal Emergency Management Agency.
- Ferrigni, F. & Helly, B. éd., 1990. *Protection du patrimoine bâti dans les zones à risque sismique. Analyses et interventions*, Rixensart : PACT 28 Belgique.
- Ferrigni, F. et al., 1993. ATLAS des cultures sismiques locales. Réduire la vulnérabilité du bâti par la récupération des cultures sismiques locales. Disponible sur : www.hisoma.mom.fr/bhelly/pdf/BH083.pdf.
- Ferrigni, F., 2005. The local seismic culture. Dans F. Ferrigni et al., éd. *Ancient buildings and earthquakes. The local seismic culture approach : principles, methods, potentialities*. Bari : Edipuglia, p. 199-213.
- Ferrigni, F. et al. éd., 2005. *Ancient buildings and earthquakes. The local seismic culture approach : principles, methods, potentialities*, Bari : Edipuglia.
- Feyerabend, P., 1988. *Contre la méthode. Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Paris: Seuil.
- Fischer, G.-N., 1987. *Les concepts fondamentaux de la psychologie sociale* Quatrième, Paris : Dunod.
- Forest, J. & Faucheux, M., 2013. Rationalité créative. Vers la mise en oeuvre d'une pédagogie de l'aventure. Dans J. Caron Côté, éd. *Actes du VII colloque Questions de Pédagogies dans l'Enseignement Supérieur. Les innovations pédagogiques en enseignement supérieur, 3-5 juin 2013, Sherbrooke, Canada*. Sherbrooke : Université de Sherbrooke, p. 505-511.
- Fréchet, J. & Albin, P., 2008. Jean Vogt 1929-2005. His life as a seismologist, geologist, geographer, and historian. Dans J. Fréchet, M. Meghraoui, & M. Stucchi, éd. *Historical seismology. Interdisciplinary studies of past and recent earthquakes*. Londres : Springer, p. 3-16.
- Fréchet, J., Meghraoui, M. & Stucchi, M. éd., 2008. *Historical seismology. Interdisciplinary studies of past and recent earthquakes*, Londres : Springer.
- Fressoz, J.-B., 2012. *L'apocalypse joyeuse. Une histoire du risque technologique*, Paris : Éditions du Seuil.
- Frey, P., 2010. *Learning from vernacular. Pour une nouvelle architecture vernaculaire*, Arles : Actes sud.
- Fritsche, S. et al., 2006. Reconstructing the damage field of the 1855 earthquake in Switzerland. Historical investigations on a well-documented event. *Geophysical Journal International*, 166(2), p.719-731.
- Gagnon, M. & Hébert, D., 2000. *En quête de science. Introduction à l'épistémologie*, Saint-Laurent : Fides.
- Galeota, A., 2010. *La prima ora. Nel cratere, 6 aprile 2009*, L'Aquila : Portofranco.
- Galeotti, R., 2014. 2 febbraio 1703, il grande terremoto che distrusse L'Aquila. *Revue on-line, fl Formiche. Analisi, commenti e scenari*. Disponible sur : www.formiche.net.
- Galli, P. & Camassi, R., 2009. *Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009*, Dipartimento della Protezione Civile Nazionale & Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Disponible sur : http://emidius.mi.ingv.it/DBMI08/aquilano/query_eq/quest.pdf.
- Gasparroni, A., 2010. La devozione dimenticata e il recupero dell'identità: due santi per un terremoto. *Notizie dalla Delfico*, (1-3/210), p.13-17.
- Giardini, D., Jiménez, J. & Grünthal, G., 2003. European-mediterranean seismic hazard map. Disponible sur : www.preventionweb.net/files/10049_10049ESCSESAMEposterA41.jpg.
- Giardini, D., 2006. L'aléa sismique dans l'arc alpin. Dans *Actes du Symposium PRINAT. La prise en compte du risque sismique dans l'arc alpin, 3 octobre 2006, Martigny, Suisse*. Martigny : PRINAT - Création du Pôle des risques naturels en montagne de la COTRAO, p. 4-10.
- Gisler, M., Fäh, D. & Schibler, R., 2003. Two significant earthquakes in the Rhine valley at the end of the 18th century. The events of december 6, 1795 and april 20, 1796. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 96(3), p.357-366.
- Gisler, M., Fäh, D. & Deichmann, N., 2004. The Valais earthquake of december 9, 1755. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 97(3), p.411-422.

- Gisler, M., Kozák, J. & Vaněk, J., 2008. The 1855 Visp (Switzerland) earthquake. A milestone in macroseismic methodology ? In J. Fréchet, M. Meghraoui, & M. Stucchi, éd. *Historical seismology. Interdisciplinary studies of past and recent earthquakes*. Londres : Springer, p. 231-247.
- Giuffrè, A., 1988. *Monumenti e terremoti. Aspetti statici del restauro*, Rome : Multigrafica.
- Giuffrè, A. éd., 1993. *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia* Quatrième, Bari : Laterza.
- Giustizieri, G., 2014. Gigli della memoria, ecco la vera storia. *Il Centro*. Disponible sur : <http://ilcentro.gelocal.it/laquila/cronaca/2014/01/09/news/gigli-della-memoria-ecco-la-vera-storia-1.8440043>.
- Grant, R.A. & Halliday, T., 2010. Predicting the unpredictable. Evidence of pre-seismic anticipatory behaviour in the common toad. *Journal of Zoology*, 281(4), p.263-271.
- Gruber, P., 2007. *Adaptation and earthquake resistance of traditional Nias architecture*. Rapport de recherche, Université Technique de Vienne (Autriche).
- Grünthal, G., Levret, A. & European Seismological Commission, 2001. *L'échelle macrosismique européenne. European macroseismic scale 1998 (EMS-98)*, Luxembourg : Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie.
- Guidoboni, E. & Poirier, J.-P., 2004. *Quand la terre tremblait*, Paris : Odile Jacob.
- Guidoni, E., 1975. *Architettura primitiva*, Milan : Electa.
- Gülhan, D. & Güney, I.Ö., 2000. The behaviour of traditional building systems against earthquake and its comparison to reinforced concrete systems. Experiences of Marmara earthquake, damage assessment studies in Kocaeli and Sakarya. Dans The International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, 16-18 novembre 2000, Istanbul (Turquie).
- Helly, B., 1995. Local seismic cultures. A european research program for the protection of traditional housing stock. *Annali di geofisica*, XXXVIII(5-6), p.791-794.
- Helly, B. & Rideaud, A., 2012. Atlas des cultures sismiques anciennes dans l'espace méditerranéen. Disponible sur : www.archeoseismicity.org/resources/themes/archaeoseismicity/files/pdf/atlas-document_atlas-manifest_w3.pdf.
- Hicyilmaz, K., 2011. *Dhajji dewari. Affordable seismically resistant and sustainable housing*, Dubai : Arup Gulf Ltd.
- Houben, H. & Guillaud, H., 1989. *Traité de construction en terre*, Marseille : Parenthèses.
- Huang, H., 2010. *Fujian Tulou. A treasure of chinese traditional civilian residence*, SDX Joint Publishing Company.
- Hughes, R., 2000. Cator and cribbage construction of Northern Pakistan. Dans The International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, 16-18 novembre 2000, Istanbul (Turquie).
- Hughes, R. & Lubkowski, Z.A., 2000. *The survey of earthquake damaged non-engineered structures. A field guide by EEFIT*, Londres : Earthquake Engineering Field Investigation Team & Institution of Structural Engineers.
- Hughes, R., 2005. Vernacular architecture and construction techniques in the Karakoram. Dans S. Bianca, éd. *Karakoram. Hidden treasures in the Northern areas of Pakistan*. Turin : Umberto Allemandi & Co, Aga Khan Trust for Culture, p. 99-132.
- Ikeya, M., 2004. *Earthquakes and animals. From folk legends to science*, New Jersey : World Scientific.
- Isik, B., 2009. Seismic rehabilitation study in Turkey for existing earthen construction. Dans M. Hardy, C. Cancino, & G. Ostergren, éd. *Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium, april 11-13, 2006, Los Angeles, United States*. Los Angeles : Getty Conservation Institute, p. 93-100.
- Jodidio, P., 2011. *The Aga Khan Historic Cities Programme. Strategies for urban regeneration*, Munich: Prestel.
- Judge, A., 1994. Les métaphores comme véhicules transdisciplinaires de l'avenir. Dans *L'Homme, la Science et la Nature*. Paris : Le Mail, p. 168-204.

- Kapetana, P. & Dritsos, S., 2007. Seismic assessment of buildings by rapid visual screening procedures. Dans C. A. Brebbia, éd. *Earthquake resistant engineering structures VI*. Wessex : WIT Press, p. 409-418.
- Kaplan, H. et al., 2010. Structural damages of L'Aquila (Italy) earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, p.499-507.
- Karababa, F.V. & Guthrie, P.M., 2006. Vulnerability reduction through local seismic culture. The case study of Lefkada, Greece. Dans R. Brody, éd. *2006 IEEE International Symposium on Technology and Society: Proceedings ISTAS'06 - Disaster Preparedness and Recovery, June 9-10, 2006, New York, United States*. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Karababa, F.V., 2007. *Local seismic construction practices as a means to vulnerability reduction and sustainable development. A case study in Lefkada island, Greece*. Thèse de Doctorat, Université de Cambridge (Angleterre).
- Karakostas, C. et al., 2005. Seismic response of structures and infrastructure facilities during the Lefkada, Greece earthquake of 14/8/2003. *Engineering Structures*, 27(2), p.213-227.
- Kelley, S.J., Sendova, V. & Gavrilovic, P., 2000. Seismic protection of byzantine churches. Dans The International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, 16-18 novembre 2000, Istanbul (Turquie).
- Kizis, Y., 1977. *Traditional houses of Pelion (a conservation approach)*. Thèse de Diplôme, Université d'York (Angleterre).
- Kontogiannis, P., 2010. *Numerical evaluation of the « cator and cribbage » technique*. Thèse de Master, Université College de Londres (Angleterre).
- Korkmaz, H.H., Korkmaz, S.Z. & Donduren, M.S., 2010. Earthquake hazard and damage on traditional rural structures in Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (10), p.605-622.
- Korup, O., 2010. Earthquake-triggered landslides. Spatial patterns and impacts. Disponible sur : www.cces.ethz.ch/projects/hazri/COGEAR/publications/tde1_1a.1.1.pdf.
- Kozak, J. & Cermák, V., 2010. *The illustrated history of natural disasters*, New York : Springer.
- Kuhn, T.S., 1970. *La structure des révolutions scientifiques* Deuxième., Paris : Flammarion.
- Kulatunga, U., 2010. Impact of culture towards disaster risk reduction. *International Journal of Strategic Property Management*, 14(4), p.304-313.
- Kunz, P., 1996. Vulnérabilité des populations. Dans J. J. Wagner, éd. *Tremblements de terre dans l'arc alpin, effets, prévention à l'occasion des 50 ans du séisme du Valais central. Colloque, 8 et 9 février 1996, Sion, Valais, Suisse*. Sion : Institut Universitaire Kurt Bösch, p. 39-41.
- Lagomarsino, S. et al., 2004. The 31st october 2002 earthquake in Molise (Italy). A new methodology for the damage and the seismic vulnerability survey of the churches. Dans The 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1-6 août 2004, Vancouver (Canada).
- Lagomarsino, S., 2006. On the vulnerability assessment of monumental buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), p.445-463.
- Lagomarsino, S., 2012. Damage assessment of churches after L'Aquila earthquake (2009). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(1), p.73-92.
- Langenbach, R., 2000. Intuition from the past. What can we learn from traditional construction in seismic areas. Dans The International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, 16-18 novembre 2000, Istanbul (Turquie).
- Langenbach, R., 2002. Survivors in the midst of devastation. Traditional timber and masonry construction in seismic areas. Dans The 7th US National Conference on Earthquake Engineering, 21-25 juillet 2002, Boston (Etats-Unis).
- Langenbach, R., 2003. Survivors amongs the rubble. Traditional timber-laced masonry buildings that survived the great 1999 earthquakes in Turkey and the 2001 earthquake in India, while modern buildings fell. Dans S. Huerta et al., éd. *Proceedings of the First International Congress on Construction History, January 20-24, 2003, Madrid*. Madrid : Instituto Juan de Herrera, p. 1257-1268.

- Langenbach, R., 2007. From « opus craticium » to the « Chicago frame ». Earthquake-resistant traditional construction. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(1), p.29-59.
- Langenbach, R., 2009. *Don't tear it down! Preserving the earthquake resistant vernacular architecture of Kashmir*, New Delhi : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Langenbach, R., 2010. Rescuing the baby from the bathwater. Traditional masonry as earthquake-resistant construction. Dans The 8th International Masonry Conference, 4-7 juillet 2010, Dresden (Allemagne).
- Langenbach, R., 2013. Timber frames and solid walls. Earthquake resilient construction from roman times to the origins of the modern skyscraper. Dans The 1st International Symposium on Historic Earthquake-Resistant Timber Frames in The Mediterranean Area H.Ea.R.T.2013, 4-5 novembre 2013, Cosenza (Italie).
- Lang, K., 2002. *Seismic vulnerability of existing buildings*. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (Suisse).
- Lascoumes, P., 1996. La précaution comme anticipation des risques résiduels et hybridation de la responsabilité. *L'Année sociologique*, 46(2), p.359-382.
- Latina, C., 1989. *Terremoti e costruzioni. Progetto e tecnologia della resistenza sismica*, Florence : Alinea.
- Laureano, P., 2008. Traditional knowledge role for security and mitigation of water conflicts. Dans *Water culture and water conflict in the Mediterranean area*. Séminaires Méditerranéens. Bari : Centre International des Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes, p. 173-183.
- Lehmann, S., Moccia, F. & Reinle, J., 2013. *Efficacité d'insertions en bois dans la terre crue. Tests de compression simple sur des échantillons de terre crue*. Rapport du cours de l'Unité d'enseignement ENAC *Apprendre du vernaculaire_la terre crue*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse).
- Lestuzzi, P., 2003. ABE tremble. Votre immeuble est-il parasismique ? Disponible sur : www.rts.ch/emissions/abe/logement/1369447-abe-tremble-votre-immeuble-est-il-parasismique.html.
- Lestuzzi, P., 2008. *Séismes et construction. Éléments pour non-spécialistes*, Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Lestuzzi, P. & Badoux, M., 2008. *Génie parasismique. Conception et dimensionnement des bâtiments*, Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Lestuzzi, P., 2013. *Evaluation parasismique des constructions existantes. Bâtiments en maçonnerie et en béton armé*, Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Lettere, M., 2012. Il biopotere e la massa nella realtà di un sisma. Dans S. Minardi & R. Salvatore, éd. *O.R.eS.Te. Osservare, comprendere e progettare per ricostruire a partire dal terremoto dell'Aquila*. Homeless Book, p. 227-257.
- Liang, R. & Hota, G., 2009. Hakka Tulou and science. A NSF project prospectus. Dans The Forum on Hakka Tulous. Lessons to Be Learned, Past, Present and Future, 24 juin 2009, Xiamen (Chine).
- Liang, R., Stanislawski, D. & Hota, G., 2011. Structural responses of Hakka rammed earth buildings under earthquake loads. Dans The International Workshop on Rammed Earth Materials and Sustainable Structures & Hakka Tulou Forum 2011, Xiamen (Chine).
- Ligi, G., 2009. *Antropologia dei disastri*, Rome : Laterza.
- Lim-Castillo, P., 2007. Eggs in philippine church architecture and its cuisine. Dans R. Hosking, éd. *Eggs in cookery. Proceedings of the Oxford Symposium on Food and Cookery 2006*. Trowbridge : Prospect Books, p. 114-124.
- Liu, B.Y. et al., 2006. Damage of village buildings in recent Yunnan earthquakes. Dans The 4th International Conference on Earthquake Engineering, 12-13 octobre 2006, Taipei (Taiwan).
- Lourenço, P.B., 2004. Analysis and restoration of ancient masonry structures. Guidelines and examples. Dans The International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration IMTCR-04, 6-9 juin 2004, Lecce (Italie).
- Lovelock, J., 1993. *La terre est un être vivant. L'hypothèse Gaïa*, Paris : Flammarion.

- Love, R.J. et al., 2004. *Learning from earthquakes. The EERI learning from earthquakes program. A brief synopsis of major contributions*, Oakland : Earthquake Engineering Research Institute.
- Lüchinger, D. & Sturny, C., 2014. *Comportement sismique de la maçonnerie de type bhatar*. Rapport du projet de semestre, Filière de génie civil, Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (Suisse).
- Marietan, I., 1946. Le tremblement de terre du 25 janvier 1946. *Bulletin de la Murithienne*, (63), p.70-87.
- Marincioni, F. et al., 2012. Perception and communication of seismic risk. The 6 april 2009 L'Aquila earthquake case study. *Earthquake Spectra*, 28(1), p.159-183.
- Martinelli, A. et al., 2009. Sisma Abruzzo 6 aprile 2009. La gestione dell'attività di rilievo del danno degli edifici ordinari. *Edilizia*, (161), p.48-53.
- Martini, F. d. G., 1480. *Trattato di architettura civile e militare*, Chevalier Cesare Saluzzo.
- Masciari-Genoese, F., 1915. *Trattato di costruzioni antisismiche preceduto da un corso di sismologia*, Milan : Hoepli.
- Matteucci, P., 2013. L'Aquila, quattro anni dopo il sisma. In aumento i casi di depressione. *La Repubblica*. Disponible sur : www.repubblica.it/cronaca/2013/03/26/news/sisma_aquila_traumi_psicologici-55362695/?ref=HREC1-12.
- Mayer-Rosa, D., 1996. Séismicité dans les alpes et zonation sismique. Dans J. J. Wagner, éd. *Tremblements de terre dans l'arc alpin, effets, prévention à l'occasion des 50 ans du séisme du Valais central. Colloque, 8 et 9 février 1996, Sion, Valais, Suisse*. Sion : Institut Universitaire Kurt Bösch, p. 20-23.
- May, J. & Reid, A., 2010. *Architettura senza architetti. Guida alle costruzioni spontanee di tutto il mondo*, Milan : Rizzoli.
- Mazzolani, F.M., 2012. Protezione sismica degli edifici storici mediante tecniche miste reversibili. Dans R. Nudo, éd. *Lezioni dai terremoti. Fonti di vulnerabilità, nuove strategie progettuali, sviluppi normativi : atti del convegno tenuto a Chianciano Terme l'8 ottobre 2010*. Florence : Firenze University Press, p. 15-23.
- McAdoo, B.G. et al., 2006. Smong. How an oral history saved thousands on Indonesia's Simeulue island during the december 2004 and march 2005 tsunamis. *Earthquake Spectra*, 22(S3), p.661-669.
- McDonough, W. & Braungart, M., 2012. *Cradle to cradle. Créer et recycler à l'infini*, Paris : Alternatives.
- Michel, C., Oropeza, M. & Lestuzzi, P., 2010. *Validate the building inventory and important infrastructure in the test area & development of theoretical fragility functions*, Coupled Seismogenic Geohazards in Alpine Regions & Competence Center Environment and Sustainability.
- Milizia, F., 1781. *Principi di architettura civile* Deuxième., Bassano : Remondini.
- Milutinovic, Z., Trendafiloski, G. & Olumceva, T., 1995. *Disaster preparedness planning for small and medium size hospitals based structural, nonstructural and functional vulnerability assessment*, Skopje: World Health Organization.
- Minke, G., 2001. *Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth*, Eschborn : Building Advisory Service & Information Network.
- Miranda, A., 2006. Les multiples représentations du risque dans la région de Naples. Dans F. Walter, B. Fantini, & P. Delvaux, éd. *Les cultures du risque. XVI^e-XXI^e siècle*. Travaux d'histoire suisse. Genève: Presses d'histoire suisse, p. 153-168.
- Mkrtychyan, V., 2000. The 1988 Giumri (Armenia) earthquake. Some thoughts and conclusions on the comparative performance of traditional and reinforced concrete buildings. Dans The International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, 16-18 novembre 2000, Istanbul (Turquie).
- Moutsopoulos, N.C., 1971. Architecture populaire de Macédoine. Dans Symposium ICOMOS CSSR 1971. Premier Colloque sur les Problèmes posés par la Sauvegarde de l'Architecture Populaire, Bratislava (Slovaquie).
- Munari, M., 2010. *Sviluppo di procedure per valutazioni sistematiche di vulnerabilità sismica di edifici esistenti in muratura*. Thèse de Doctorat, Université des Etudes de Padoue (Italie).

- Munich Re Group, 2009. World map of natural hazards, 4th edition.
- Murteira, H., 2004. The Lisbon earthquake of 1755. The catastrophe and its european repercussions. *Economia Global e Gestão (Global Economics and Management Review)*, 10, p.79-99.
- Murty, C.V.R., 2005. Learning earthquake design and construction 11. What are the indian seismic codes? *Resonance. Journal of science education*, 10(1), p.83-87.
- Naderzadeh, A., 2009. Application of seismic base isolation technology in Iran. *Menshin Journal*, (63), p.40-47.
- Namicev, P., 2005. *Ruralnata arhitektura vo jugozapadna Makedonija. Od XIX-ot i pocetokot na XX-ot vek = Vernacular architecture in the Southwest Macedonia*, Skopje : Musée de la Macédoine.
- Namicev, P., 2007. *Development of vernacular house in Macedonia from the 19th and early 20th century*, Skopje : Meri Pejaska.
- NIKER éd., 2010. Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements, and materials. Annex 2 Contributions of partners. Disponible sur : www.niker.eu.
- Oliveira, D.V. et al., 2006. Experimental investigation on the structural behaviour and strengthening of three-leaf stone masonry walls. Dans P. B. Lourenço et al., éd. *Proceedings of the 5th International Conference Structural Analysis of Historical Constructions. Possibilities of Numerical and Experimental techniques, november 6-8, 2006, New Delhi, India*. New Delhi : MacMillan, p. 817-826.
- Oliver, P., 1987. *Dwellings. The house across the World*, Oxford : Phaidon.
- Oliver, P. éd., 1997. *Encyclopedia of vernacular architecture of the world*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Oliver, P., 2006a. Afterword. Raising the roof. Dans L. Asquith & M. Vellinga, éd. *Vernacular architecture in the twenty-first century. Theory, education and practice*. Oxon : Taylor & Francis, p. 262-268.
- Oliver, P., 2006b. *Built to meet needs. Cultural issues in vernacular architecture*, Londres : Elsevier Architectural Press.
- Oliver-Smith, A., 1996. Anthropological research on hazards and disasters. *Annual Review of Anthropology*, 25, p.303-328.
- Oliver-Smith, A., 1999. « What is a disaster ? ». Anthropological perspectives on a persistent question. Dans A. Oliver-Smith & S. M. Hoffman, éd. *The angry earth. Disaster in anthropological perspective*. New York : Routledge, p. 18-34.
- Oumou, D., 2011. *Modélisation de la vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie soumis à l'action d'un séisme par modélisation aux éléments discrets*. Rapport du projet de semestre, Magistère de mécanique, Université Joseph Fourier de Grenoble (France).
- Ouwehand, C., 1964. *Namazu-e and their themes. An interpretative approach to some aspects of japanese folk religion*, Leiden : Brill.
- Oxfam International, 2005. *Un endroit où rester, un endroit où vivre*, Oxfam International. Disponible sur : https://oxfam.qc.ca/sites/oxfam.qc.ca/files/2005-12-14_Un_endroit_ou_rester.pdf.
- Pankaj, A. & Thakkar, S.K., 2003. A summary of article. An experimental study of effectiveness of seismic and retrofitting measures in stone masonry houses. *Earthquake Hazard Centre Newsletter, New Zealand*, 7(1), p.3-5.
- Parajuli, H.R., 2009. *Dynamic analyses of low strength masonry houses based on site specific earthquake ground motions*. Thèse de Doctorat, Université de Kyoto (Japon).
- Di Pasquale, S., 1996. *L'arte del costruire. Tra conoscenza e scienza*, Venise : Marsilio.
- Patton, C.V. éd., 1988. *Spontaneous shelter. International perspectives and prospects*, Philadelphia : Temple University Press.
- Paula, R. & Córias, V., 2006. Rehabilitation of Lisbon's old « seismic resistant » timber framed buildings using innovative techniques. Dans The International Workshop on Earthquake Engineering on Timber Structures, 9-10 novembre 2006, Coimbra (Portugal).

- Pfister, C., 2002a. Catastrophes et dangers naturels dans une perspective historique. Introduction. Dans C. Pfister, éd. *Le jour d'après. Surmonter les catastrophes naturelles : le cas de la Suisse entre 1500 et 2000*. Berne : Haupt, p. 11-25.
- Pfister, C., 2002b. Surmonter les catastrophes naturelles. Les stratégies de 1500 à nos jours. Dans C. Pfister, éd. *Le jour d'après. Surmonter les catastrophes naturelles : le cas de la Suisse entre 1500 et 2000*. Berne : Haupt, p. 209-254.
- Pichard, P., 1984. *Après un séisme. Mesures d'urgence, évaluation des dommages*, Paris : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Picon, A., 1996. Towards a history of technological thought. Dans R. Fox, éd. *Technological change. Methods and themes in the history of technology*. Amsterdam : Routledge, p. 37-49.
- Pierotti, P. & Ulivieri, D., 2001. *Culture sismiche locali. Garfagnana e Lunigiana*, Pise : Edizioni Plus-Università di Pisa.
- Placanica, A., 1985. *Il filosofo e la catastrofe. Un terremoto del Settecento*, Turin : Einaudi.
- Porphyrios, D.T.G., 1971. Traditional earthquake-resistant construction on a Greek Island. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 30(1), p.31-39.
- Porter, K.A., 2002. Learning from earthquakes. A survey of surveys. Dans The EERI Invitational Workshop: An Action Plan to Develop Earthquake Damage and Loss Data Protocols, 19-20 septembre 2002, Pasadena, Californie (Etats-Unis).
- Qubādiyān, V., 2007. *Barrasi-i iqlīmī-i abniyah-i sunnatī-i Īrān*, Téhéran : Dānishgāh-i.
- Rainer, R., 1977. *Anonymes Bauen im Iran*, Graz : Akademische Druck - u. Verlagsanstalt.
- Rantucci, G., 1994. *Geological disasters in the Philippines. The July 1990 earthquake and the June 1991 eruption of Mount Pinatubo : description, effects and lessons learned*, Rome : Diane.
- Rapoport, A., 1969. *House form and culture*, Englewood Cliffs : Prentice-Hall.
- Rautela, P. & Joshi, G.C., 2007. *Earthquake safe koti banal architecture of Uttarakhand, India*, Dehradun: Government of Uttarakhand.
- Rautela, P. & Joshi, G.C., 2008. Earthquake-safe koti banal architecture of Uttarakhand, India. *Current Science*, 95(4), p.475-481.
- Rautela, P. et al., 2008. *Timber-reinforced stone masonry (koti banal architecture) of Uttarakhand and Himachal Pradesh, Northern India*, Earthquake Engineering Research Institute & International Association for Earthquake Engineering. Disponible sur : http://world-housing.net/whesearch1list.php?cmb_COUNTRY=INDIA&con=asia.
- Reinhardt, O. & Oldroyd, D.R., 1983. Kant's theory of earthquakes and volcanic action. *Annals of Science*, 40(3), p.247-272.
- Resta, F. & Brunamonti, B., 1998. Tracce di strutture lignee nella torre dell'orologio di Pavia. *Costruire in laterizio*, (61), p.54-59.
- Revi, A. & Kishore, K., 1994. Post-earthquake reconstruction in Marathwada. *Architecture+Design*, p.17-27.
- Rondelet, J.-B., 1834. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir* Septième., Paris : Firmin Didot Frères Librairies.
- Rossetto, T. et al., 2009. *The L'Aquila, Italy, earthquake of 6 April 2009. A preliminary field report by EEFIT*, Londres : Earthquake Engineering Field Investigation Team.
- Rovero, L. & Toniatti, U., 2012. Criteri metodologici per l'intervento sul costruito storico a rischio sismico. Istanze di sicurezza, istanze di salvaguardia e l'insegnamento delle culture costruttive locali. Dans R. Nudo, éd. *Lezioni dai terremoti. Fonti di vulnerabilità, nuove strategie progettuali, sviluppi normativi : atti del convegno tenuto a Chianciano Terme l'8 ottobre 2010*. Florence : Firenze University Press, p. 289-300.
- Rudofsky, B., 1965. *Architecture without architects. A short introduction to non-pedigreed architecture*, New York : Doubleday.

- Rudofsky, B., 1979. *L'architecture insolite. Une histoire naturelle de l'architecture concernant, en particulier, ses aspects le plus souvent négligés ou totalement ignorés*, Paris : Tallandier.
- Ruegg, F., 2010. *La maison rurale. Histoire et mythe, essai sur l'habitat rural*, Gollion : Infolio.
- Ruggieri, N., 2005. La casa antisismica. Dans G. Tampone, éd. *Proceedings of the International Conference on Conservation of Historic Wooden Structures, february 22-27, 2005, Florence, Italy*. Florence : Collegio degli Ingegneri della Toscana, p. 141-146.
- Rungmanee, S. & Cruz, I., 2005. Le savoir qui a sauvé les nomades de la mer. *Planète Science*, 3(2), p.20-23.
- Şahin Güçhan, N., 2007. Observations on earthquake resistance of traditional timber-framed houses in Turkey. *Building and Environment*, 42(2), p.840-851.
- Saklani, P.M., Nautiyal, V. & Nautiyal, K.P., 1999. Sumer, earthquake resistant structures in the Yamuna valley, Garhwal Himalaya, India. *South Asian Studies*, 15, p.55-65.
- Sarà, G., 2012. Analisi dei dissesti in occasione dei terremoti. Metodologie ed obiettivi. Dans R. Nudo, éd. *Lezioni dai terremoti. Fonti di vulnerabilità, nuove strategie progettuali, sviluppi normativi : atti del convegno tenuto a Chianciano Terme l'8 ottobre 2010*. Florence : Firenze University Press, p. 3-9.
- Schacher, T., 2008a. *Dhajji research project. Report of field visit in Pakistan*, Canobbio : University of Applied Sciences of Southern Switzerland. Disponible sur : www.worldhabitat.supsi.ch/doc_pakistan.pdf.
- Schacher, T., 2008b. Good engineering without appropriate communication doesn't lead to seismic risk reduction. Some thoughts about appropriate knowledge transfer tools. Dans The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12-17 octobre 2008, Pékin (Chine).
- Schacher, T., 2008c. Timber reinforced stone masonry in Northern Pakistan in the context of the post-earthquake reconstruction efforts. Dans The Azores 2008 International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone Masonry Housing, 9-13 juillet 2008, Horta (Portugal).
- Schacher, T., 2009. *Confined masonry. For one and two storey buildings in low-tech environments : a guidebook for technicians and artisans*, Kanpur : National Information Centre of Earthquake Engineering.
- Schacher, T. & Ali, Q., 2009. *Dhajji construction. For one and two storey earthquake resistant houses: a guidebook for technicians and artisans*, Pakistan : University of Engineering and Technology of Peshawar in Pakistan & University of Applied Sciences of Southern Switzerland.
- Schacher, T., Ali, Q. & Stephenson, M., 2010. Mainstreaming of traditional earthquake resistant building methods. The example of the dhajji method in the post-earthquake reconstruction process in Pakistan. Dans The International Scientific Conference on Technologies for Development, 8-10 février 2010, Lausanne (Switzerland).
- Schlosser, F., Vidal, H. & Legrand, J., 1969. La terre armée. *Bulletin de Liaison LCPC*, (41), p.101-144.
- Schlosser, F., 1972. La terre armée. Recherches et réalisations. *Bulletin de Liaison LCPC*, (62), p.79-92.
- Schlosser, F. & Guilloux, A., 1982. La terre armée. Dans *Journée d'étude, 14 janvier 1981 à Lausanne, 6 mars 1981 à Zurich. Ouvrages spéciaux en terre et en enrochements : terre armée et gabions*. Zurich : Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches & Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, p. 7-26.
- Schmid, F., 2002. « Grande est la détresse, plus grand encore est l'amour du prochain ». La gestion des inondations de 1868 dans l'espace alpin. Dans C. Pfister, éd. *Le jour d'après. Surmonter les catastrophes naturelles : le cas de la Suisse entre 1500 et 2000*. Berne : Haupt, p. 55-68.
- Shah, A.A., 2006. *Disasters and vernacular architecture. Issues and cases (Pakistan/India)*. Thèse de post-Master, Université Catholique de Louvain (Belgique).
- Shah, V.R. & Tayyibji, R., 2008. The Kashmir house, its seismic adequacy and the question of social sustainability. Dans The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12-17 octobre 2008, Pékin (Chine).
- Shaw, R., Uy, N. & Baumwoll, J. éd., 2008. *Indigenous knowledge for disaster risk reduction. Good practices and lessons learned from experiences in the Asia-Pacific region*, Bangkok : United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

- Sherdenkovska, M., 2011. *Mijac's habitation building. Origins, development and achievements*. Thèse de Doctorat, Université Saints-Cyrille-et-Méthode de Skopje (Macédoine).
- Sinha, R. & Goyal, A., 2002. A national policy for seismic vulnerability assessment of buildings and procedure for rapid visual screening of buildings for potential seismic vulnerability. Disponible sur : www.civil.iitb.ac.in/~rsinha/Vulnerability_Assessment.pdf.
- Stellingwerff, G., 1932. *Costruzioni antisismiche (come vincere i terremoti)*, Milan : Hoepli.
- Stengers, I., 2013. *Une autre science est possible. Manifeste pour un ralentissement des sciences*, Paris: Découverte.
- Stephenson, M., 2008. Notes from experience in post-earthquake rural housing reconstruction in Pakistan. Dans The Building Back Better Workshop, juillet 2008, Pékin (Chine).
- Stephenson, M. et al., 2008. The challenges of reconstruction after the october 2005 Kashmir earthquake. Dans The NZSEE Annual Conference 2008 Engineering an Earthquake Resilient New Zealand, 11-13 avril 2008, Wairakei (Nouvelle-Zélande).
- Stiros, S.C., 1995. Archaeological evidence of antiseismic constructions in antiquity. *Annali di geofisica*, 38(5-6), p.725-736.
- Stuber, M., 2002. Punition divine ou objet de recherche ? L'écho des tremblements de terre, des inondations, des épidémies et des famines dans le réseau de correspondants d'Albert de Haller. Dans C. Pfister, éd. *Le jour d'après. Surmonter les catastrophes naturelles : le cas de la Suisse entre 1500 et 2000*. Berne : Haupt, p. 39-54.
- Studer, J.A. et al., 2010. *Manuel pour l'évaluation des bâtiments après un tremblement de terre. Détermination de l'habitabilité des bâtiments résidentiels*, Berne : Office Fédéral de la Protection de la Population, Association des Établissements Cantonaux d'Assurance Incendie & Association Suisse d'Assurances.
- Sumanov, L., 1990. Traditional sun-baked (adobe) brick structures in Macedonia, Yugoslavia. Dans K. Grimstad, éd. *6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture. Adobe 90 preprints, october 14-19, 1990, Las Cruces, New Mexico, United States*. Los Angeles : Getty Conservation Institute, p. 131-136.
- Sumanov, L., 2003. Transfer of knowledge for saving human lives living tradition. Use of traditional horizontal timber belts as anti-seismic elements. Dans The 14th ICOMOS General Assembly and International Symposium Place, Memory, Meaning. Preserving Intangible Values in Monuments and Sites, 27-31 octobre 2003, Victoria Falls (Zimbabwe).
- Suyehiro, Y., 1934. Some observations on the unusual behaviour of fishes prior to an earthquake. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, Suppl.(1), p.228-231.
- Tertulliani, A. et al., 2011. An application of EMS98 in a medium-sized city. The case of L'Aquila (Central Italy) after the april 6, 2009 Mw 6.3 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(1), p.67-80.
- Thakkar, J. & Morrison, S., 2008. *Mātrā. Ways of measuring vernacular built forms of Himachal Pradesh*, Ahmedabad : Centre for Environmental Planning and Technology.
- Tobriner, S., 1997. La casa baraccata. Un sistema antisismico nella Calabria del XVIII° secolo. *Costruire in Laterizio*, (56), p.110-115.
- Tobriner, S., 1998. Response of traditional wooden japanese construction. Disponible sur : <http://nisee.berkeley.edu/kobe/tobriner.html>.
- Tobriner, S., 2000. Wooden architecture and earthquakes in Istanbul. A reconnaissance report and commentary on the performance of wooden structures in the Turkish earthquakes of 17 august and 12 november 1999. Dans The International Conference on the Seismic Performance of Traditional Buildings, 16-18 novembre 2000, Istanbul (Turquie).
- Toganidis, N., 2007. Parthenon restoration project. Dans The 21st International CIPA Symposium, 1-6 octobre 2007, Athènes (Grèce).
- Touliatos, P., 1993. Traditional aseismic techniques in Greece. Dans L. Mendes Victor, éd. *Proceedings of the International Workshop Les Systèmes Nationaux face aux Séismes Majeurs*. Lisbonne : EUR-OPA Major Hazards, p. 110-124.

- Travaglio, M., 2009. *Sangue e cemento. Le domande senza risposta sul terremoto in Abruzzo*, Rome : Editori riuniti.
- Triantafyllou, T.C. & Fardis, M.N., 1997. Strengthening of historic masonry structures with composite materials. *Materials and Structures*, 30(8), p.486-496.
- Tsakanika-Theohari, E., 2009. The constructional analysis of timber load bearing systems as a tool for interpreting aegean bronze age architecture. Dans *Proceedings of the Symposium Bronze Age Architectural Transitions in the Eastern Mediterranean. Diffusion and Diversity, may 7-8, 2008, Munich, Germany*. Weilheim : Verein zur Forderung der Aufarbeitung der Hellenischen Geschichte, p. 127-142.
- UNDP, 2004. *Reducing disaster risk. A challenge for development : a global report*, New York : United Nations Development Programme.
- UNISDR éd., 2009. *Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe*, Genève : United Nations International Strategy for Disaster Reduction.
- Vincent, B., 1996. Les tremblements de terre en Espagne et au Portugal. Dans B. Bennassar, éd. *Les catastrophes naturelles dans l'Europe médiévale et moderne. Actes des XV^{es} Journées Internationales d'Histoire de l'Abbaye de Flaran, 10,11 et 12 septembre 1993*. Toulouse : Presses universitaires du Mirail, p. 77-94.
- Vintzileou, E. et al., 2007. Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkada, Greece. *Construction and Building Materials*, 21(1), p.225-236.
- Vintzileou, E., 2008. Effect of timber ties on the behavior of historic masonry. *Journal of Structural Engineering*, 134(6), p.961-972.
- Viollet-Le-Duc, E., 1856. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, Paris : Bance.
- Vissilia, A.-M. & Villi, M., 2010. Adobe and timber ties as main construction materials for an historic greek dwelling. *International Journal of Architectural Heritage. Conservation, Analysis, and Restoration*, 4(4), p.295-319.
- Wagner, J.J. & Delaloye, M., 1996. Table ronde. Dans J. J. Wagner, éd. *Tremblements de terre dans l'arc alpin, effets, prévention à l'occasion des 50 ans du séisme du Valais central. Colloque, 8 et 9 février 1996, Sion, Valais, Suisse*. Sion : Institut Universitaire Kurt Bösch, p. 43-47.
- Walter, F., 2008. *Catastrophes. Une histoire culturelle, XVI^e-XXI^e siècle*, Paris : Seuil.
- Wang, K. et al., 2006. Predicting the 1975 Haicheng earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), p.757-795.
- Weidmann, M., 2003. *Tremblements de terre en Suisse*, Coire : Desertina.
- Wenk, T., Lacave, C. & Kaspar, P., 1998. Adana-Ceyhan, Turquie, séisme du 27 juin 1998. *Ingénieurs et architectes suisses*, 124(21), p.350-354.
- Wisner, B. et al., 2004. *At risk. Natural hazards, people's vulnerability, and disasters* Deuxième., Londres & New York : Routledge.
- Woo, G., 2011. *Calculating catastrophe*, Londres : Imperial College Press.
- Wutt, K., 1981. *Pashai. Landschaft, Menschen, Architektur*, Graz : Akademische Druck - u. Verlagsanstalt.
- Zacek, M., 1996. *Construire parasismique. Risque sismique, conception parasismique des bâtiments, réglementation*, Marseille : Editions Parenthèses.
- Zacek, M., 2004a. Conception parasismique. Niveau avant-projet. Dans P. Balandier & M. Zacek, éd. *Conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie*. Coll. conception parasismique. Villefontaine : Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau.
- Zacek, M., 2004b. Vulnérabilité et renforcement. Dans P. Balandier & M. Zacek, éd. *Conception, vulnérabilité, urbanisme et sismologie*. Coll. conception parasismique. Villefontaine : Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau.
- Zürcher, E. et al., 2010. Looking for differences in wood properties as a function of the felling date. Lunar phase-correlated variations in the drying behavior of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.) and Sweet Chestnut (*Castanea sativa* Mill.). *Trees*, 24(1), p.31-41.

LISTE DES FIGURES

Image de couverture : Hofmann

Fig.1	Weidmann 2003	18
Fig.2	Adaptée de Allander	18
Fig.3	Munich Re Group	38
Fig.4	a,b) Adaptées de Munich Re Group	39
Fig.5	Volger 1856 dans Gisler et al. 2008	47
Fig.6	a,b) http://pinktentacle.com 2011	50
Fig.7	a) Heusser 1856 dans Fritsche et al. 2006 ; b) EPFL ; c) Keystone ; d) Schmid-Médiathèque Valais	51
Fig.8	Volger 1856 dans Weidmann 2003	52
Fig.9	a,b) Stuber 2002 ; c) Berghaus 1888 dans Gisler et al. 2008	55
Fig.10	a,b) Placanica, 1985	56
Fig.11	Placanica 1985	58
Fig.12	a) Doufour et Raymond 1992 ; b) Kozák et Cermák 2010 ; c) Latina 1989	59
Fig.13	Pesso 1876 dans Barucci 1990	60
Fig.14	Langenbach	62
Fig.15	a) Gisler et al. 2008 ; b) Schmid, Médiathèque Valais	64
Fig.16	Würmser 1360 dans Kozák et Cermák 2010	66
Fig.17	a) Carozzino ; b) Ferrigni et al. 2005 ; c) Bazzurro et al. 2009	66
Fig.18	a,b) Google Earth	71
Fig.19	www. treehouse-maps.com	72
Fig.20	Giardini, Jiménez & Grunthal	72
Fig.21	DPC-INGV	72
Fig.22	a,b) Hofmann	73
Fig.23	a,b) Hofmann	73
Fig.24	Fonticulano 1575 D'Antonio 2013	76
Fig.25	www.comune.castelfidardo.an.it	77
Fig.26	Castelli & Camassi	78
Fig.27	Hofmann	78
Fig.28	a,b) Hofmann	79
Fig.29	a,b,c) Hofmann	83
Fig.30	a,b,c) Hofmann	83
Fig.31	a,c) Hofmann ; b) Hotel99cannelle ; d) D'Antonio) ; e) Lagomarsino	84
Fig.32	a) Lattanzi ; b) Borri ; c) Munari ; d) Lagomarsino ; e) Vigili del fuoco	85
Fig.33	a,b,c,d) Hofmann	86
Fig.34	a,b,c,d) Hofmann	87
Fig.35	a,b,c,d) Hofmann	87
Fig.36	a,b,c) Hofmann	88
Fig.37	a,b,c,d) Hofmann	88
Fig.38	a,b,c,d) Hofmann	89
Fig.39	Hofmann	90
Fig.40	Sieberg dans Kozák et Cermák 2010	103
Fig.41	a,b) Eazytraveler ; c) Hofmann	108
Fig.42	a) Hofmann ; b,e,g) Grodwhol ; c) Khansari et Yavari ; d) Rainer ; f) Qubādiyān	109
Fig.43	a,b) Wolff ; c) Pudjisuryadi ; d) Hofmann	110
Fig.44	a) EEFIT ; b) Aytun	111
Fig.45	a,d,f,g) Hofmann ; b) Meda Corpus ; c) Borri ; e) D'Antonio.	112
Fig.46	a,c,d,e) Hofmann ; b) Schacher	113
Fig.47	a) Hofmann ; b,c,d,e) Langenbach	114
Fig.48	a,b,c) Hofmann ; d,e) Abdessemed Foufa et Benouar ; f) Meda Corpus	115
Fig.49	a) Hofmann ; b) Jones ; c) Wutt ; d) Edelberg ; e) Hrishi ; f,g) Edelberg	116
Fig.50	a) Hofmann ; b,c) Rautela et Joshi ; d) Schacher ; e,f,g) Thakkar et Morrison	117
Fig.51	a) Hofmann ; b,c,e,f) Schacher) ; d) wikipedia	118

Fig.52	a,b,c) Hofmann ; d) D'Antonio 2013 ; e) Tsakanika-Theohari ; f) Liu et al. 2006.	119
Fig.53	a) Hofmann ; b,e) Makarios et Demosthenous ; c) Karababa et Guthrie ; f) Porphyrios ; d) Revi et Kishore	120
Fig.54	a) Hofmann ; b) Fabrizio 1933 ; c) Langenbach ; d) Barucci 1990 ; e) Tobriner	121
Fig.55	a) Hofmann ; b,c) Langenbach ; d) Prolocoreggio-calabria	122
Fig.56	a,b,c,d) Hofmann ; e,f) Schacher	123
Fig.57	a,b,c) Hofmann	124
Fig.58	a,b,c) Hofmann	124
Fig.59	a,b,c) Hofmann	125
Fig.60	a) Hofmann	125
Fig.61	a,b) Hofmann	125
Fig.62	a,b) Hofmann ; c) Takkar et Dave	126
Fig.63	Rautela et Joshi	127
Fig.64	a,b,c) Hofmann	127
Fig.65	a) Makarios et Demosthenous ; b) Karababa et Guthrie ; c) Cardoso ; d) Schacher	128
Fig.66	a,b,c,d) Hofmann	128
Fig.67	Edelberg	128
Fig.68	a) Schacher ; b) Hofmann ; c) wikipedia	129
Fig.69	a,b,c,d) Hofmann	130
Fig.70	a,b) Hofmann	130
Fig.71	a,b,c,d,e,f) Hofmann	131
Fig.72	Google Earth	139
Fig.73	a) Giardini, Jiménez & Grunthal ; b) USGS	140
Fig.74	www. treehouse-maps.com	140
Fig.75	a,b,c) Hofmann	142
Fig.76	a,b,c,d) Hofmann	144
Fig.77	a,b,c) Hofmann	145
Fig.78	a,b,c) Hofmann	145
Fig.79	a,b,c) Hofmann	145
Fig.80	Hofmann	145
Fig.81	a,b,c,d) Hofmann	146
Fig.82	Hofmann	146
Fig.83	a,b,c) Hofmann	146
Fig.84	Hofmann	147
Fig.85	a,b) Hofmann	147
Fig.86	a,b,c,d) Hofmann	148
Fig.87	a,b,c,d) Hofmann	148
Fig.88	a,b,c) Hofmann	149
Fig.89	a,b,c) Hofmann	149
Fig.90	a,b,c,d) Hofmann	149
Fig.91	a,b,c,d) Hofmann	150
Fig.92	Hofmann	151
Fig.93	a,b,c) Hofmann	152
Fig.94	a,b,c) Hofmann	153
Fig.95	a,b,c) Hofmann	153
Fig.96	a,b,c,d) Hofmann	154
Fig.97	a,b,c) Hofmann	154
Fig.98	a,b) Hofmann	154
Fig.99	a,b,c) Hofmann	155
Fig.100	a,b,c,d) Hofmann	155
Fig.101	a,b,c,d,e) Hofmann	156
Fig.102	a,b,c) Hofmann	156
Fig.103	a,b,c) Hofmann	157
Fig.104	a,b,c) Hofmann	157
Fig.105	Hofmann	157
Fig.106	a,b) Hofmann	158
Fig.107	Hofmann	159
Fig.108	Hofmann	160

Fig.109	a,b,c,d) Hofmann	161
Fig.110	a,b,c) Hofmann	161
Fig.111	a,b,c,d) Hofmann	163
Fig.112	Gall 1566 dans Kozák et Cermák 2010).	169
Fig.113	a) Centro Ricerche Archeologiche e Scavi ; b) Choisy 1883 ; c) Violet-Le-Duc 1856 ; d) Resta et Brunamonti	173
Fig.114	a,b) Hofmann	174
Fig.115	Hofmann	174
Fig.116	a,b,c,d,e) Lehmann, Moccia et Reinle	175
Fig.117	a,b,c,d) Lehmann, Moccia et Reinle	175
Fig.118	a,b) Lehmann, Moccia et Reinle	176
Fig.119	Recocanada dans Anger 2011	177
Fig.120	Anger	177
Fig.121	a) Thompson ; b) Chao ; c,d) Hofmann	178
Fig.122	a,b) Porte dans Anger 2011 ; c) www.miningartifacts.org	179
Fig.123	a) Oroles ; b) Codrin ; c,d) Gavet) ; e) Rondelet 1834	180
Fig.124	a) Vincent ; b) Ostrowski ; c) Cloquet ; d) Xiang Lin	181
Fig.125	a) Allison ; b) Flowerday	181
Fig.126	a) Hunziker ; b) Patrimoine Suisse Section Valais ; c) EPFL	182
Fig.127	a,b,c) Rudaz-Médiathèque Valais) ; d) Hofmann	183
Fig.128	a,b) Hunziker ; c) Giardini, Jiménez & Grunthal ; d) Hallet et Samizay ; e,f) Hilti	183
Fig.129	Munich Re Group	184
Fig.130	a,b) EPFL	184
Fig.131	a,b,c) Sturny et Lüchinger	185
Fig.132	Hofmann	186
Fig.133	Hofmann	186
Fig.134	Hofmann	187
Fig.135	Hofmann	187
Fig.136	Hofmann	188
Fig.137	Hofmann	188
Fig.138	Hofmann	189
Fig.139	a,b,c,d) Schacher ; e) Stephenson	194
Fig.140	a) Hofmann ; b) www.kocaeli.bel.tr	197
Fig.141	a) www.houshamadyan.org ; b) Hofmann	197
Fig.142	Hofmann	197
Fig.143	a) Municipalité de Bursa ; b) Hofmann	197
Fig.144	a,b) Google Earth	201
Fig.145	Giardini, Jiménez & Grunthal	202
Fig.146	www. treehouse-maps.com	202
Fig.147	a,b) Hofmann	203
Fig.148	a,b) Hofmann	203
Fig.149	a,b) Hofmann	203
Fig.150	Google Earth	204
Fig.151	Hofmann	206
Fig.152	a,b) Hofmann	207
Fig.153	a,b) Hofmann	207
Fig.154	a,b,c) Hofmann	208
Fig.155	a,b,c) Hofmann	208
Fig.156	a,b,c,d) Hofmann	209
Fig.157	a,b,c,d) Hofmann	210
Fig.158	Hofmann	211
Fig.159	a,b,c) Hofmann	211
Fig.160	Hofmann	211
Fig.161	a,b,c) Hofmann	211
Fig.162	Hofmann	212
Fig.163	a,b) Hofmann	212
Fig.164	a,b,c,d) Hofmann	212
Fig.165	a,b,c) Hofmann	213

Fig.166	Hofmann	213
Fig.167	a,b,c) Hofmann	214
Fig.168	a,b) Hofmann	214
Fig.169	a,b,c,d,e,f) Hofmann	218
Fig.170	a,b,c,d,e,f,g) Hofmann	219
Fig.171	a,b) Hofmann	220
Fig.172	a,b,c) Hofmann	220
Fig.173	a,b,c) Hofmann	221
Fig.174	a,b,c) Hofmann	221
Fig.175	a,b,c) Hofmann	222
Fig.176	a,b,c,d,e) Hofmann	222
Fig.177	a,b,c) Hofmann	223
Fig.178	a,b) Hofmann	223
Fig.179	a,b) Hofmann	223
Fig.180	a,b) Hofmann	224
Fig.181	Kozák et Cermák 2010	231

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1	Thématiques principales et sujets corrélés qui ont été traités dans le cadre de cette thèse, avec indication de ceux approfondis dans les trois études de cas.	37
Tab.2	Schéma des domaines d'analyse principaux (surface hachurée) découlant du croisement des trois thématiques considérées pour l'étude de cas de cette partie.	69
Tab.3	Tableau combinant l'année et le degré d'intensité sismique des 12 tremblements de terre d'une intensité supérieure à VI ayant eu lieu pendant la période de 1920 à 2013, avec les cinq tranches d'âge déterminées sur la base du nombre de séismes ressentis.	80
Tab.4	Schéma de synthèse des aspects se rapportant aux trois domaines d'analyses considérés.	99
Tab.5	Schéma de l'implication que peut avoir l'illisibilité des particularités constructives parasismiques dans l'affaiblissement, sur le long terme, d'une culture locale du risque.	100
Tab.6	Schéma de l'interaction entre les représentations populaires et institutionnelles du risque, mentionnant les aspects que la gestion contemporaine du risque pourrait intégrer en vue de son optimisation.	101
Tab.7	Schéma synthétisant les facteurs principaux qui stimulent le raffermissement de la sensibilité sismique des populations, entre deux tremblements de terre.	102
Tab.8	Diagrammes illustrant le degré d'importance estimé des six caractéristiques parasismiques, sur la bonne performance sismique de deux types de structures : a) Maçonnerie avec insertions horizontales en bois en forme d'échelle, b) Ossature en bois à section réduite avec remplissage.	132
Tab.9	Schéma des domaines d'analyse principaux (surface hachurée) découlant du croisement des trois thématiques considérées pour l'étude de cas de cette partie.	137
Tab.10	Sismicité historique indicative des quatre régions considérées.	141
Tab.11	Niveau de diffusion des architectures en maçonnerie comprenant des insertions horizontales en bois dans les quatre régions, avec indication sur la hauteur des murs et sur la matière de la maçonnerie.	144
Tab.12	Variantes constructives et caractéristiques parasismiques : associations hypothétiques.	150
Tab.13	Récapitulatif des aspects constructifs variant entre les sites visités dans les quatre régions.	151
Tab.14	Niveau de diffusion des architectures à ossature bois avec remplissage dans les quatre régions, avec indication sur la hauteur des parois et sur la matière du remplissage.	152
Tab.15	Variantes constructives et caractéristiques parasismiques : associations hypothétiques.	158
Tab.16	Récapitulatif des aspects constructifs variant entre les sites visités dans les quatre régions.	159
Tab.17	Niveau de diffusion des architectures en maçonnerie comprenant des éléments horizontaux et verticaux en bois dans les quatre régions, avec indication sur la hauteur des murs et sur la matière de la maçonnerie.	160
Tab.18	Récapitulatif des 372 bâtiments considérés dans les 31 sites visités.	162
Tab.19	Schéma de synthèse des aspects se rapportant aux trois domaines d'analyses considérés.	165
Tab.20	Schéma synthétisant la méthode d'analyse pour l'identification des variantes constructives susceptibles d'être adaptées au niveau local de risque sismique.	166
Tab.21	Schéma synthétisant la méthode d'analyse pour l'identification des particularités structurelles susceptibles d'augmenter l'efficacité d'un procédé constructif particulier envers les tremblements de terre.	167
Tab.22	Schéma synthétisant la méthode d'analyse pour l'identification des cultures constructives et des singularités constructives susceptibles de posséder un caractère parasismique.	168

Tab.23	Quatre cas de projets menés par les institutions gouvernementales turques visant la réparation de constructions affectées par des événements sismiques, la restauration de celles en mauvais état, ou encore la rénovation intégrale de bâtiments abandonnés.	197
Tab.24	Schéma des domaines d'analyse principaux (surface hachurée) découlant du croisement des trois thématiques considérées pour l'étude de cas de cette partie.	199
Tab.25	Dégâts sismiques constatés et facteurs favorisant leur formation : associations hypothétiques.	216
Tab.26	Récapitulatif des solutions constructives locales parasismiques, les rapportant aux cinq paramètres déterminant l'efficacité sismique du procédé constructif.	225
Tab.27	Schéma de synthèse des aspects se rapportant aux trois domaines d'analyses considérés.	227
Tab.28	Schéma évoquant l'apport potentiel des analyses conduites après des séismes modérés dans l'accroissement des connaissances relatives aux mécanismes de rupture d'un procédé constructif, ainsi que dans les activités de prévention.	228
Tab.29	Schéma synthétisant l'implication bénéfique que pourrait avoir la participation de constructeurs et d'entrepreneurs locaux aux missions de reconnaissance post-séisme dans le processus de réduction de la vulnérabilité sismique du bâti.	229
Tab.30	Schéma indiquant les modalités selon lesquelles pourrait avoir lieu la propagation à l'échelle régionale et internationale des enseignements, relatifs à l'efficacité sismique d'un procédé constructif, tirés après des séismes de puissance modérée.	230

L'ensemble de ces tableaux (illustrations avec préfixe « Tab. ») ont été réalisés par l'auteur.

CURRICULUM VITAE

Milo Hofmann, architecte EPFL, DSA-terre
Né le 26 septembre 1980 à Locarno, Suisse

Formation

2011-2015

Thèse de doctorat : programme doctoral en architecture et sciences de la ville EDAR, école doctorale EDOC, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse

2008-2010

Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement DSA-Architecture de terre, Laboratoire CRAterre, chaire UNESCO, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (ENSAG), France

2005

Master of Arts en Architecture, EPFL, Suisse

Expériences professionnelles

2011-2015

Assistant : Archives de la construction moderne (ACM), Institut d'architecture (IA), Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit (ENAC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse

2012-2014

Chargé de cours : Unité d'Enseignement ENAC *Apprendre du vernaculaire_la terre crue*, EPFL, Suisse

2010

Evaluation de projets de reconstruction d'habitats dans la province d'Aceh en Indonésie, 5 ans après le tsunami de 2004 ; laboratoire CRAterre-ENSAG & Fondation Abbé Pierre, France

2007-2008

Bureau d'architecture Pezzoli et Associés SA, Renens, Suisse

2006-2007

Travail de recherche sur l'utilisation du bambou dans l'architecture vernaculaire en Inde et réalisation d'un bâtiment paracyclonique en bambou avec les artisans locaux, Etat de l'Orissa ; Fondation Geisendorf, Suisse

2006

Assistant : cours ENAC, EPFL, Suisse

2005-2006

Service civil : EPFL-ENAC-IA-ACM, Suisse

2000-2001

Bureau d'architecture Briccola, Giubiasco, Suisse

Colloques

The 2014 Tech4Dev, International Conference, UNESCO Chair in Technologies for Development : What is Essential ? 4-6 juin 2014, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

Poster présenté : *Looking for vernacular paraseismic building workmanlike manner.*

CIAV 2013 Annual Conference from the International Committee of Vernacular Architecture of ICOMOS, 16-20 octobre 2013, Ecole Supérieure d'Architecture Gallaecia, Vila Nova de Cerveira, Portugal.

Article présenté : *Learning from vernacular building practices. A starting point for risk mitigation.*

Séminaire *Cultures Constructives Parasismiques : les Voies de la Recherche*, 27-28 mai 2013, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, France.

Article présenté : *Learning from effects of earthquakes on vernacular architecture. Seismic damages investigation as key activity for disaster risk réduction.*

Publications

Hofmann, M. & Caimi, A., 2014. Learning from vernacular building practices. A starting point for risk mitigation. In M. Correia, G. Carlos, & S. Rocha, éd. *Vernacular heritage and earthen architecture. Contributions for sustainable development*. Londres : Taylor & Francis Group, p. 703-709.

Hofmann, M., 2013. Learning from effects of earthquakes on vernacular architecture. Seismic damages investigation as key activity for disaster risk réduction. In E. Samin, éd. *Disaster-resistant building cultures. The ways forward ?* Grenoble : CRAterre-ENSAG, p. 114-117 (en cours de finalisation).

Garnier, P. et al., 2009. *Aléas naturels, catastrophes et développement local*, Grenoble & Villefontaine : CRAterre éditions.

Interviews

Hohler, A. & van der Poel, C., 2011. Redécouvrir les techniques parasismiques vernaculaires. *Tracés, Bulletin technique de la Suisse romande*, 137(5-6), p.17-20.

Rete tre, Radio de la Suisse italienne, 31 décembre 2012. Architettura vernacolare parasismica. *Baobab Ambiente*.