



**HAL**  
open science

## Vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie : Analyse et exemples d'intervention sur des cas réels

F. Velardo, A. Frau

### ► To cite this version:

F. Velardo, A. Frau. Vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie : Analyse et exemples d'intervention sur des cas réels. 9ème Colloque Nationale AFPS 2015, Nov 2015, Marne-La-Vallée, France. cea-02491640

**HAL Id: cea-02491640**

**<https://cea.hal.science/cea-02491640>**

Submitted on 26 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie – Analyse et exemples d’intervention sur des cas réels

Francesco Velardo\*,\*\* — Alberto Frau\*\*\*

\* *Computational Engineering and Structures, 175 impasse des Chênes 84810 Aubignan FRANCE*

\*\* *AVENG Engineering, via Polonghera 29, 10138 Torino ITALIE*

\*\*\* *CEA, DEN, DANS, DM2S, SEMT, Laboratoire d’Etudes de Mécanique Sismique. F-91191 Gif-sur-Yvette (France).*

---

*RÉSUMÉ. Le reclassement sismique des bâtiments à l’intérieur du territoire européen est l’un des aspects les plus importants introduits dans les normes en vigueur. En Italie, avec la loi P.C.M. 3274/2003, la nécessité d’appliquer les principes parasismiques à tous les bâtiments et ouvrages d’art présents sur le territoire national a été imposée. Une grande partie du patrimoine italien bâti (y compris les bâtiments et ouvrages stratégiques) possède une structure porteuse en maçonnerie. La majorité de ces constructions a été bâtie avant l’introduction du premier zonage sismique (Regio Decreto n.193 18.04.1909) et l’approche semi-probabiliste (Arrêté ministériel 5.03.1984). La tendance naturelle consistera donc à réhabiliter le patrimoine existant et la problématique de la vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie deviendra fondamentale. Dans cet article, un cas d’étude est présenté afin d’illustrer les étapes que l’ingénieur doit nécessairement respecter afin de connaître, comprendre, modéliser et améliorer le comportement d’un bâtiment en maçonnerie ancienne.*

*ABSTRACT. The seismic repositioning in the European regions is one the most important aspect introduced with the regulations entered in force. In Italy, the P.C.M 32274/203 law imposes the earthquake-proof design for the whole historical buildings and monuments that are built in the country. Most of them are composed by a masonry supporting structure. A lot of these structures are constructed before the first regulation concerning the earthquake safety (ministerial decree 5.03.1984). Thus, the renovation of the existing building will be a critical topic in the future. In this paper we discuss a case study in order to describe the set of the required stages that is necessary for knowing, understanding, modelling and improving the historical buildings erected using a masonry supporting structure.*

*MOTS-CLÉS : maçonnerie, assainissement, modélisation.*

*KEYWORDS: masonry, renovation, modelling.*

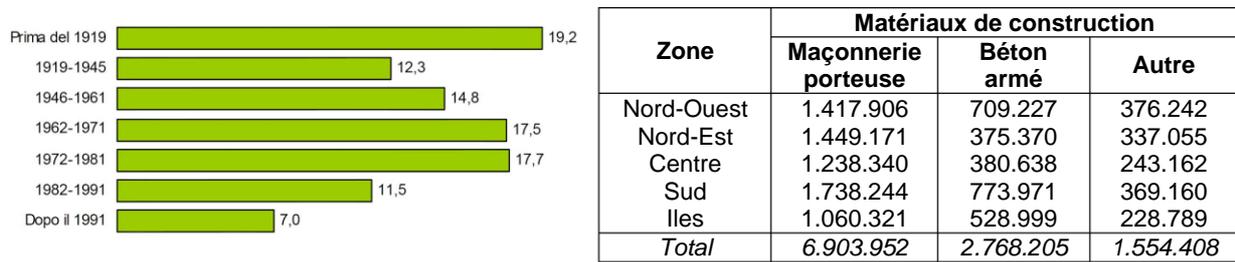
---

## 1. Introduction

La définition d’un nouveau zonage sismique dans l’ensemble du territoire européen est l’un des aspects les plus importants introduits dans les règlements (Eurocodes et autres). Suite à ces modifications, des zones non sismiques (ou à faible risque sismique) ont subi une réévaluation mettant en jeu une amplification de l’intensité sismique.

Conformément à l’annexe P.C.M 3274/2003 (P.C.M. 3274, 2003), l’Italie a étendu l’obligation de suivre les dispositions parasismiques à l’ensemble du territoire national. De plus, des mesures consistant à réduire l’occupation du sol ont été mises en place. En conséquence, la problématique de renforcement face au risque sismique est devenue prioritaire, spécialement dans le contexte italien.

Le parc immobilier en Italie est composé des 14 millions de bâtiments dont 80% sont à usage résidentiel et 20% non résidentiel. Il est important de préciser que 64% de ces bâtiments ont été bâtis avant 1974 (année de l’entrée en vigueur de la première loi parasismique Loi n. 64 du 2 Février 1974 (Legge 64, 1974)) et 61,5% d’entre eux présentent une structure porteuse en maçonnerie (figure 1).



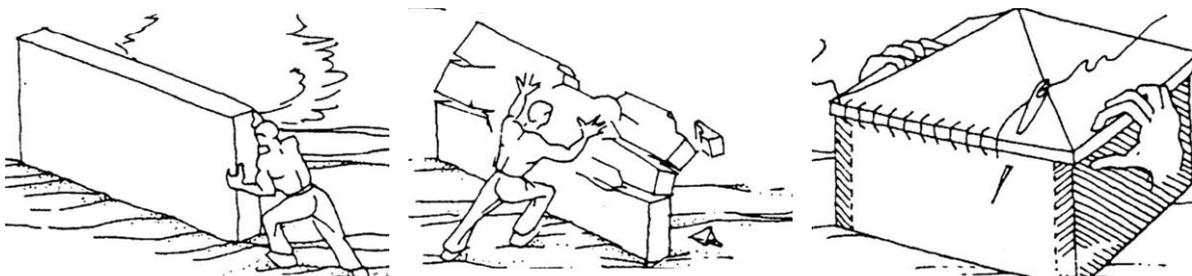
**Figure 1.** Répartition des bâtiments à usage résidentiel par époque de construction (gauche) et par matériaux de construction (droite), recensement 2001 source ISTAT (gauche).

Dans ce contexte, les bâtiments en maçonnerie les plus anciens présentent les problèmes les plus importants surtout face au renforcement parasismique. Ceux-ci sont amplifiés par le manque de connaissances relatives aux modifications apportées aux structures dans le passé ; en effet le manque de traces officielles constitue un véritable handicap pour leur identification. La détérioration de la structure au cours du temps constitue également une difficulté supplémentaire. Une analyse fine et précise est donc nécessaire. Dans ce document, nous procéderons par étapes pour l'analyse exhaustive de la structure d'un immeuble dans le but d'identifier les interventions nécessaires à sa réhabilitation.

## 2. Comportement des structures en maçonnerie

Avant de passer à l'analyse du cas d'étude, dans ce paragraphe, nous rappelons les bases du comportement des structures en maçonnerie et, donc, les règles de conception utilisées. La structure en maçonnerie est conçue et réalisée comme un assemblage tridimensionnel de murs et de planchers afin d'assurer un fonctionnement dit « à boîte ». Ce dernier lui confèrera la stabilité nécessaire tout en lui permettant de transmettre les actions horizontales et verticales vers le sol.

La complexité du comportement de la maçonnerie nécessite dans la phase de conception, une série d'hypothèses visant à simplifier le problème. En général, on considère les murs comme des éléments porteurs qui reprennent les charges verticales et horizontales (fonction de contreventement) et les planchers comme des éléments horizontaux et rigides qui répartissent les charges verticales aux murs (comportement à diaphragme).



**Figure 2.** Mécanismes fondamentaux des structures en maçonnerie – a) très bon comportement des murs dans leur plan ; b) faible résistance des murs pour les actions hors plan ; c) comportement « à boîte ».

Le comportement idéalisé du type « boîte » (plancher rigide et bonnes liaisons avec et entre les murs) a toujours été utilisé et repris dans la législation en vigueur où l'on constate que, dans la mesure du possible, tous les murs contribuent à la capacité portante de la structure. Nous rappelons qu'en présence de forces horizontales,

il est nécessaire de disposer d'éléments verticaux dans deux directions orthogonales. De plus, leur capacité à résister à ces actions dépend non seulement des caractéristiques matériaux mais aussi des charges verticales (hors séisme) qui agissent sur l'élément (actions stabilisantes). La connexion entre les éléments doit être assurée par la mise en place de chaînages au niveau des planchers et du toit ainsi que par l'utilisation de dispositifs constructifs assurant la liaison entre les murs et la répartition des charges (figure 2). L'application de ces règles permet, d'une part, à l'ingénieur d'appliquer des méthodes d'analyse simplifiées et, d'autre part, de bénéficier d'une structure plus résistante.

### 3. Cas d'étude : Bâtiment dans le centre historique de la ville de Cirié (Région de Turin - Italie)

Le bâtiment est une résidence située dans le centre historique de la ville de Cirié (Région de Turin - Italie) qui a fait l'objet des travaux de rénovation où la maîtrise d'œuvre est assurée par l'architecte Mario Macchiorlatti Dalmas. Il fait partie d'une série d'immeubles édifiés en 1500. La structure a été l'objet de plusieurs modifications dans le passé non seulement dans la répartition interne des espaces mais aussi dans le rôle attribué à l'immeuble au cours des siècles.

#### 3.1. Procédure pour l'évaluation de la sûreté structurelle

Comme mentionné précédemment, les bâtiments anciens peuvent faire l'objet de différentes interventions au cours de leur vie. En conséquence, l'emploi de matériaux, ou de techniques de construction différentes, rendent impossible la prédiction de modalités d'intervention spécifiques. Pour cette raison, par le biais de son expertise, l'ingénieur se doit de définir et de justifier, pour chaque cas, les choix concernant les modèles, les propriétés matériaux et les chargements à appliquer pour l'évaluation de sûreté de la structure.

##### 3.1.1. Analyse historique

Une première analyse consiste à étudier et à reconstruire l'historique du processus de construction du bâtiment incluant toutes les modifications qu'il a subies au cours du temps. De plus, il est important d'avoir la vision la plus complète possible de tous les événements qui auraient pu avoir une influence significative sur le comportement de la structure porteuse (par exemple d'éventuels séismes ayant agi sur la structure).

Dans la figure 3, l'évolution au cours du temps du bâtiment est représentée à travers une vue latérale de celui-ci. En connaissant l'époque de réalisation, il sera ainsi possible pour l'ingénieur d'identifier les capacités et le comportement de la structure. Les hypothèses de calculs seront choisies afin de privilégier la sécurité.

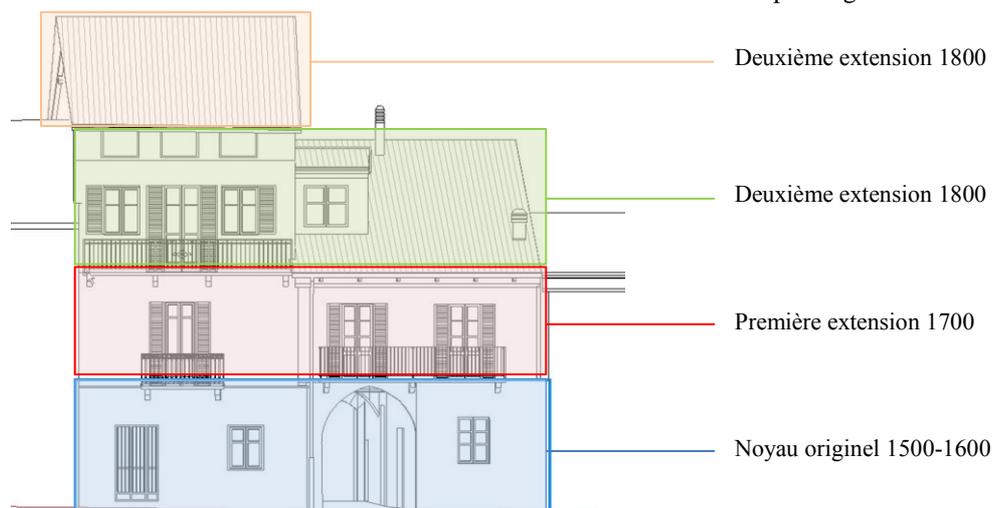


Figure 3. Evolution de la construction au cours du temps du bâtiment.

### 3.1.2. Relevé géométrique structural

Ce relevé est destiné à décrire la géométrie de l'immeuble dans son ensemble, y compris les éléments structuraux et non structuraux. Cette analyse doit aussi être réalisée sur les structures voisines qui sont en lien avec le système structural objet de l'étude. Il est nécessaire de mettre en évidence les modifications qui ont été effectuées en respectant une classification détaillée des différents éléments de la structure et en indiquant la typologie de maçonnerie des planchers, des voûtes, des murs et des chaînages et/ou liaisons.

Une importance particulière doit être accordée:

- a) à la détection des parties structurales à travers l'analyse de la qualité et de l'état de conservation de chaque matériau constitutif;
- b) à la cartographie des fissures et à d'éventuels mécanismes d'endommagement.

A ce stade, pour mieux comprendre la géométrie effective de l'immeuble, les techniques CAO en 3D s'avèrent être adéquates.

### 3.1.3. Caractérisation des matériaux

Dans le cadre des structures en maçonnerie, la caractérisation mécanique des matériaux peut être faite à l'aide :

- a) d'observations in-situ ;
- b) de données disponibles (littérature concernant des essais effectués sur des typologies similaires) ;
- c) d'essais expérimentaux basés sur un plan de sondage dédié, après avoir évalué leur impact sur la résistance de la structure selon leur utilité.

### 3.1.4. Niveau de connaissance

A la suite des procédures de caractérisation des matériaux, il sera possible de définir le « niveau de connaissance » pour chaque élément qui compose la structure. Le concept de « niveau de connaissance » est en relation avec le degré de qualité et de précision des informations à disposition. Il sert à définir des coefficients de sécurité à utiliser pour la suite de l'étude. La législation italienne fixe trois niveaux : à partir du bas (niveau de connaissance KL1-peu d'informations disponibles et mesurées in-situ) vers le haut (niveau KL3 – caractérisation plus exhaustive des résistances avec essais en laboratoire), les règlements ((UNI EN 1998-3, 1998) et (DM 14-2008, 2008)) fixent des facteurs qui ont tendance à diminuer avec le niveau.

### 3.1.5. Détermination des charges

Ensuite il est nécessaire de déterminer les charges et les combinaisons à appliquer dans le modèle numérique qui sera utilisé pour l'analyse de la sûreté et pour le dimensionnement des interventions. L'évaluation des charges permanentes sera faite conformément aux lois en vigueur ((UNI EN 1991-1-1,1991), (DM 14-01-2008, 2008)) et Annexes Nationales en ce qui concerne leur magnitude et le choix des facteurs de participation. Dans cette phase, les constatations effectuées à l'étape précédente seront fondamentales.

### 3.1.6. Définition des interventions sur l'existant

Le cadre réglementaire italien prévoit quatre typologies d'intervention :

1. Réparations ou interventions locales s'appliquant à des éléments isolés et ne concernant pas, en général, l'amélioration des caractéristiques préexistantes de sûreté ;
2. Interventions d'amélioration ayant pour objectif d'augmenter le niveau de sûreté structural existant;

3. Intervention d'assainissement permettant d'atteindre les niveaux de sûreté exigés par les législations obligatoires dans les cas de :
  - a. Surélévation ;
  - b. Agrandissement de la structure ;
  - c. Redéfinition de la classe et/ou de l'usage du bâtiment qui comporte un incrément des charges au niveau de la fondation de 10%.
4. Tout type d'interventions comportant une modification importante du comportement de la structure.

Dans le cas d'étude proposé dans cet article, ni une augmentation des charges supérieure à 10% au niveau de la fondation, ni un changement important du comportement de la structure ne sont prévus. En conséquence, l'étude en question se pose dans le cadre d'une intervention visant à atteindre les niveaux de sûreté exigés par la loi.

### 3.2. Fiche récapitulative d'évaluation de la sûreté

Pour l'enquête historique, des sources et des représentations graphiques issues de l'époque ont été consultées.



**Figure 4.** Sources historiques concernant l'agglomération de Cirié – a) source Cadastre Napoléonien ; b) et c) source Cadastre Sabaudois post - Napoléonien.

Un document plus ancien témoignant de l'existence et de la présence du bâtiment est le Cadastre Sabaudois (1534-1831). Un autre document où des informations ont été repérées a été le Cadastre Napoléonien (1808) (figure 4). Cette recherche a permis de mettre en évidence l'évolution du complexe immobilier autour du bâtiment.

Une attention particulière a été portée aux constituants des différents éléments composant la maçonnerie (forme et taille des briques), la macrostructure, y compris le système structural des voûtes et des arches. Le tout sera marqué et noté sur des fiches détaillées pendant les inspections. Dans cette phase, l'ingénieur doit décaper des éléments structuraux afin de bien analyser la maçonnerie et les éléments qui constituent les planchers.

Pour le cas d'étude en question, une inspection a eu lieu en 2014. Elle a eu pour objectif de :

- Visionner l'immeuble dans son ensemble ;
- Analyser les composants structuraux (murs, planchers et voûtes) ;
- Relever les mesures des pièces qui composent l'immeuble y compris les niveaux altimétriques ;
- Détecter les anomalies structurales.

Les premières conclusions de cette inspection sont résumées ci-dessous :

- Le bâtiment et le complexe autour présentent une structure uniforme d'un point de vue géométrique et en termes de typologie constructive ;
- Des analyses détaillées concernant les murs, arches, voûtes et planchers ont permis de dégager différentes méthodes constructives en lien avec les différentes époques de réalisation du bâtiment. En particulier, en ce qui concerne les éléments horizontaux (plancher, voûte et arches), les techniques et matériaux utilisés sont très disparates (plancher en bois, longrine et planelle etc.). L'état des éléments verticaux ne semble pas être optimal. En revanche, pour les éléments horizontaux, ceux-ci semblent corrects. Les dispositifs constructifs, mis en place pour la réalisation du toit, ne semblent pas satisfaire le niveau exigé par la loi.

Plusieurs anomalies ont été remarquées :

- Mauvaise connexion entre les murs porteurs ;
- Présence des cheminées (existantes ou cachées) proches des coins de l'habitation ;
- Perte de performance des chaînages ;
- Incrément des épaisseurs des chapes qui recouvrent les éléments horizontaux ;
- Utilisation de matériaux et de méthodologies très différents, en particulier, en ce qui concerne le mortier utilisé pour les éléments en maçonnerie ;
- Multiples interventions exécutées à des périodes différentes ;
- Présence diffuse de fissures entre éléments menant à des rigidités très différentes ;
- Mouvement du type corps rigide de certains éléments ou parties de la structure.

Nous procéderons à la rédaction de fiches détaillées, élément par élément, de chaque partie de la structure. L'objectif est de pouvoir résumer les évaluations préliminaires et les éventuelles mesures effectuées in-situ servant à la réalisation du modèle de calcul.

Dans la figure 5, des modèles de fiche détaillée pour l'immeuble considéré sont présentés. Les informations récoltées concernent en général la macrostructure de l'élément, les matériaux utilisés, leurs caractéristiques mécaniques déduites ou mesurées et d'éventuelles remarques à prendre en compte pour l'établissement de modèles plus vraisemblables.

ELEMENT MAÇONNERIE		UM 02	ELEMENT MAÇONNERIE		UM 03	TYPOLOGIE PLANCHER		S 04		
PROTO	LOCALISATION EN PLAN		PROTO	LOCALISATION EN PLAN		PROTO	LOCALISATION EN PLAN			
LOCALISATION	30001	Sub. 3 - Etage 0 - 001 (DX)	LOCALISATION	a	Générique - grenier	LOCALISATION	a	Générique - Toit		
<b>TYPOLOGIE CONSTR.</b>	Murs en maçonnerie en pierre disposés selon certaines orientations.		<b>TYPOLOGIE CONSTR.</b>	Maçonnerie et poteaux en briques pleines.		<b>TYPOLOGIE CONSTR.</b>	Toit en bois.			
<b>MACRO STRUCTURE</b>	La macrostructure est composée des gaisles avec une disposition soit à voûte soit crénelée aux extrémités et espace chaque 50 cm avec une file de brique et enclavée verticalement aux extrémités par des briques pleines. Les gaisles ont des dimensions entre 5 et 20cm avec des couches de gravill disposés par couches horizontales avec du mortier. La macrostructure est orlonnée et respecte une distribution horizontale.		<b>MACRO STRUCTURE</b>	Eléments en maçonnerie et poteaux en briques pleines solidarisés avec de la chaux et du sable. La macrostructure est régulière. Il est respecté les rangées horizontales le décalage des joints verticaux. L'armorage semble être satisfaisant.		<b>MACRO STRUCTURE</b>	Toit en bois à deux versants. Les poutres principales et secondaires semblent être en bon état. L'espacement des faux pignons semble excessive et ils présentent une inflexion excessive mais pas inquiétante.			
<b>MATERIAU</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Galet de rivière;</li> <li>Briques et gravit;</li> <li>Mortier en chaux et sable (mauvaise qualité).</li> </ul>		<b>MATERIAU</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Briques pleines;</li> <li>Mortier en chaux et sable (bonne qualité).</li> </ul>		<b>MATERIAU</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Panne fabrièr, sablièr, faux pignons et chevrons en bois.</li> <li>Tuiles du type Marseille;</li> </ul>			
<b>PARAMETRES MECANQUES</b>	$f_c$ (daN/cm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$f_c$ (daN/cm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$E$ (N/mm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$G$ (N/mm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$W$ (daN/cm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$f_c$ (daN/cm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$f_c$ (daN/cm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$E$ (N/mm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$G$ (N/mm <sup>2</sup> ) min - max KL1	$W$ (daN/cm <sup>2</sup> ) min - max KL1
	10 - 18 7,4	0,2 - 0,32 0,15	650 - 1050 650	230 - 350 230	1900	24 - 40 24	0,6 - 0,92 0,6	1200 - 1800 1200	400 - 600 400	1600
<b>NOTES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'absence de la pierre à été observée. C'est fondamentalement de constater l'absence de la présence des couches en brique entre la pierre et leur assemblage. Probables interventions effectuées au cours du temps.</li> <li>Présence des fissures au niveau de certaines arêtes différentes murs.</li> </ul>		<b>NOTES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les deux parties sont bien armées.</li> </ul>		<b>NOTES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Il faut mesurer les sections des poutres.</li> <li>Il faut mesurer les appuis et les faux pignons.</li> <li>Vérifier les jonctions et les appuis pour chaque sablier et faux pignon.</li> </ul>			
ELEMENT MAÇONNERIE		UM 02	ELEMENT MAÇONNERIE		UM 03	TYPOLOGIE PLANCHER		S 04		

Figure 5. Exemples de fiches détaillées, suite aux analyses, pour trois éléments structuraux- a) Murs en maçonnerie et pierre ; b) poteaux en maçonnerie ; c) toit en bois.

### 3.3. Modèle numérique

Pour la construction du modèle et les calculs, le logiciel VEMNL, développé par la Stacec s.r.l, est employé. La discrétisation de la structure a été faite par des éléments surfaciques.

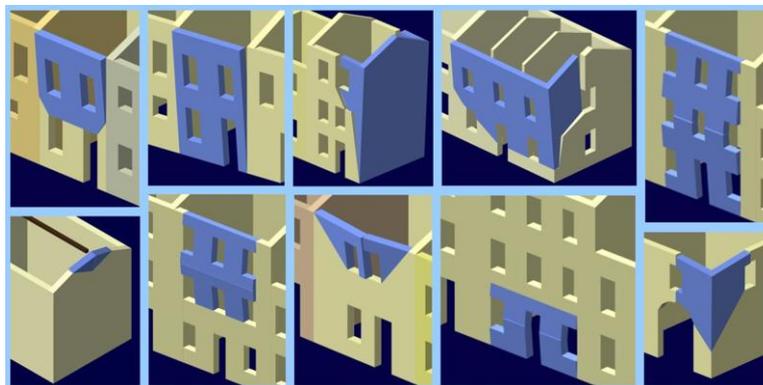
Comme mentionné précédemment, la déduction d'un modèle numérique pour une structure en maçonnerie n'est pas toujours simple. En raison de la complexité de l'ossature, plusieurs simplifications doivent être faites :

- Correction de la géométrie, surtout en présence de niches ou de changements brutaux d'épaisseur ;
- Eléments présentant une macrostructure différente, ou des propriétés mécaniques différentes, doivent être homogénéisés ;
- Les voûtes et planchers qui donnent une poussée sur les murs sont modélisés à part. En revanche, la descente des charges verticales est toujours présente ;
- Les éléments portants, mais en proportion réduite, seront introduits dans le modèle comme des charges permanentes ;
- On néglige dans cette phase l'excentricité et les imperfections qui restent dans les tolérances constructives (elles seront imposées numériquement dans le modèle et non géométriquement). En ce qui concerne les planchers, dans le cas de désalignements relativement réduits, ceux-ci seront négligés.

Les éléments négligés ici seront pris en compte dans la phase de design des interventions d'amélioration.

Le calcul a été fait via un modèle statique non linéaire du type push-over. En ce qui concerne le comportement mécanique de la maçonnerie, un comportement corps rigide pour les actions hors plan et les linteaux est supposé. En revanche, pour les efforts tranchant dans le plan, un comportement élasto-plastique parfait jusqu'à l'effort tranchant ultime  $V_u$  ((UNI EN 1996-1-1, 1996) et (UNI EN 1998-1, 1998)) est considéré. L'évaluation des résistances ultimes est obtenue selon le règlement en vigueur en appliquant les coefficients de sécurité en accord avec le niveau de connaissance fixé. Les planchers seront considérés comme étant rigides.

L'impossibilité de maîtriser le réel comportement d'une structure en maçonnerie faisant intervenir une connexion des éléments verticaux et horizontaux où le comportement « à boîte » n'étant pas assuré, implique un calcul en deux phases : en premier lieu, les mécanismes locaux (figure 6) de la structure sont détectés et une vérification locale des éléments intéressés est par la suite effectuée ; enfin un calcul d'ensemble sera réalisé. En conséquence, pour détecter des mécanismes locaux, la phase d'investigation reste un des moments les plus importants où il est nécessaire d'investir du temps afin d'avoir une représentation correcte du comportement de la structure. Parallèlement à cela, un contrôle sur les hypothèses utilisées et sur les données déduites dans la phase d'expertise doit être assuré, vis-à-vis de l'exécution des interventions, afin de pouvoir mettre à jour les données du calcul. Pour le bâtiment situé à Ciriè, il a été constaté que la majorité de ces possibles mécanismes locaux concernent les murs extérieurs des niveaux supérieurs.



**Figure 6.** Exemples des mécanismes locaux qui peuvent se présenter pour les structures en maçonnerie (Milano L. et al, 2010).

A titre d'exemple, on présente, dans la figure 7, la vérification du mur extérieur au 2<sup>ème</sup> étage pour un mouvement de renversement de type corps rigide.

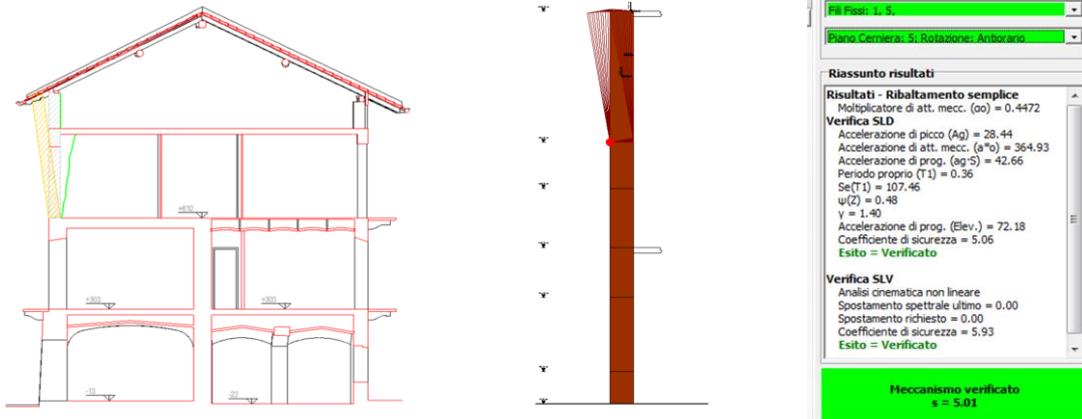


Figure 7. Vérification du mécanisme de renversement du mur extérieur du dernier étage.

Une fois les vérifications locales effectuées, il est nécessaire d'analyser le comportement global de la structure en utilisant un modèle dit « à cadre équivalent » (Gehl P. *et al*, 2010). Celui-ci permet d'obtenir la courbe de capacité pour un point de contrôle donné (en général où le déplacement est maximal). Dans les modèles, la combinaison des actions sismiques (accidentelles), en concomitances avec les charges d'exploitations et permanentes, sera considérée selon les dispositions fixées par la législation (UNI EN 1990, 1990).

Il est important de préciser que le calcul est fait pour chaque direction horizontale en déduisant la force  $F_H$  sur la structure induite par l'action sismique sur la base des spectres de dimensionnement (obtenus selon le zonage sismique et la géomorphologie du site de construction). L'action sismique sera répartie sur chaque étage de deux façons (UNI EN 1998-1, 1998) : la première implique l'utilisation d'un facteur de pondération en fonction de la masse  $W_i$  de l'étage ( $F_{hi} = F_H W_i / (\sum W_i)$ ) ; la deuxième nécessite l'établissement de la répartition en fonction de la hauteur de l'étage  $z_i$  ( $F_{hi} = F_H W_i z_i / (\sum W_i z_i)$ ). La ruine éventuelle de la structure sera évaluée sur la base de la capacité de déplacement  $u_{max}$  obtenue par le déplacement maximal du barycentre du dernier étage, une fois que la capacité plastique maximale est atteinte. Il est comparé à la « demande de déplacement »  $d_{max}$  réglementaire sur la base des spectres de dimensionnement exprimés en déplacement. De plus, la capacité élastique de la structure est déduite de la courbe de capacité réduite bilinéaire (courbe bleu-figure 8b) à partir de la courbe de capacité réduite (courbe rouge-figure 8b).

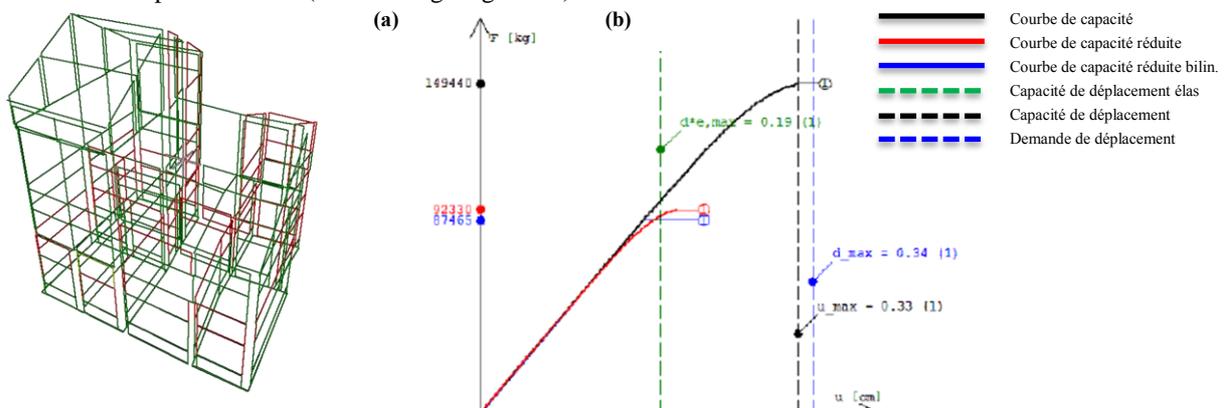


Figure 8. Résumé de (a) l'état de plastification de chaque élément composant la structure suite au calcul Push-Over, une fois que la capacité plastique maximale est atteinte, et (b) les courbes de capacité pour l'état initial (répartition  $F_{hi} = F_H W_i z_i / (\sum W_i z_i)$  des forces par étage).

La figure 8 rend compte du fait que la demande de déplacement n'est pas satisfaite. Un indicateur de risque de la structure doit ainsi être établi. Celui-ci est choisi comme étant le rapport entre le PGA réglementaire ( $PGA_{DLV}$ ) et le PGA théorique maximal ( $PGA_{CLV}$ ) pour lequel la capacité plastique maximale de la structure ( $\alpha_{uv} = PGA_{CLV}/PGA_{DLV}$ ) est attendue. Dans le cas présent, la valeur de  $\alpha_{uv}$  est de 0.9821, soit inférieure à 1.

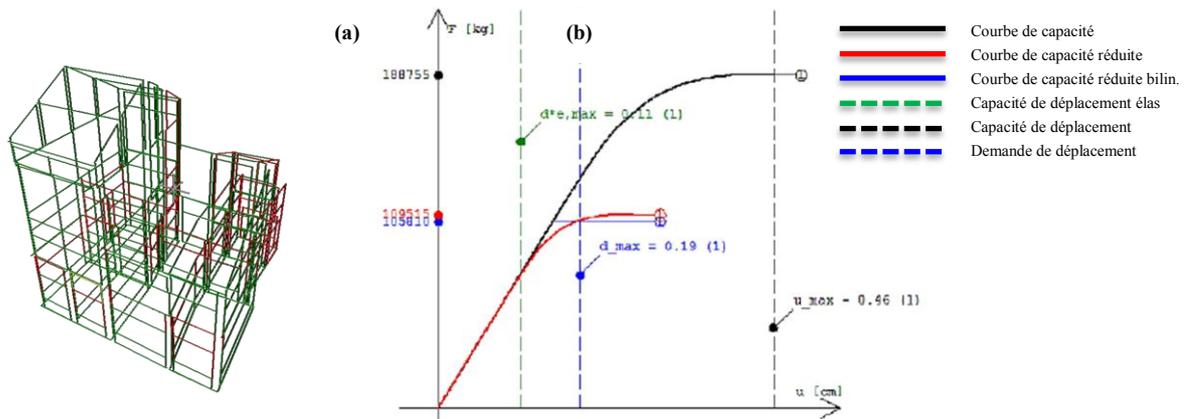
### 3.4. Etude des interventions

Dans le paragraphe précédent, il a été observé que la capacité résistante de la structure n'était pas suffisante pour satisfaire le niveau de sécurité imposé par les prescriptions règlementaires face au risque sismique. En conséquence, plusieurs interventions doivent être réalisées :

- Mise en place des chaînages pour chaque plancher et chaque mur porteur ;
- Confinement des poteaux en maçonnerie par des renforts en acier du type S235 ;
- Remplacement du mortier des joints plus dégradés avec des matériaux plus performants ;
- Mise en place d'un plâtre faiblement armé (mortier avec un module d'élasticité faible et des barres d'armature de diamètre  $\phi = 4mm$ ) dans les éléments les plus fissurés.

Ce dernier est primordial pour garantir, du point de vue des mécanismes locaux analysés dans le paragraphe précédent, un comportement de corps rigide des éléments.

La figure 9 présente les courbes de capacité obtenues suite aux interventions sur la structure. On vérifie que ces derniers apportent les améliorations nécessaires pour atteindre le niveau de sûreté demandé ( $u_{max} > d_{max}$  et  $\alpha_{uv} = 1.7054 > 1$ ).



**Figure 9.** Résumé de (a) l'état de plastification de chaque élément composant la structure suite au calcul Push-Over, une fois que la capacité plastique maximale est atteinte, et (b) les courbes de capacité après interventions (répartition  $F_{hi} = F_H W_i z_i / (\sum W_i z_i)$  des forces par étage).

Durant la phase d'exécution des travaux, il sera toutefois nécessaire de s'assurer que les solutions envisagées seront correctement mises en place pour que les améliorations du comportement de la structure prévues dans le modèle soient garanties.

## 4. Conclusions

Dans le présent article, la problématique de l'analyse des structures anciennes en maçonnerie pour l'évaluation de la sûreté face au risque sismique a été abordée. A titre d'exemple, un bâtiment en maçonnerie, situé dans la ville de Cirié dans la région de Turin (Italie), a été analysé. L'objectif de ce travail a été de mettre en évidence le niveau de difficulté auquel l'ingénieur est confronté pour ce genre d'immeuble. Nous avons décrit le processus se rapportant à la phase d'expertise, nécessaire pour récupérer toutes les informations afin de

construire les modèles de calcul et poursuivre avec les vérifications réglementaires. Cette phase, qui reste une des plus importantes, nécessite la mise en œuvre de procédures précises et claires, unies à un savoir-faire spécifique. Son importance est d'autant plus remarquable lorsque l'on s'intéresse à la modélisation de la structure. Une analyse correcte de l'évolution historique de l'immeuble et des observations effectuées in-situ permet à l'ingénieur d'avoir une vision plus claire du comportement réel de la structure et, en conséquence, des hypothèses à introduire dans le modèle afin de pouvoir bien représenter la physique du problème. Une mauvaise compréhension de ces mécanismes, indépendamment de la capacité prédictive des modèles utilisés, conduira : i) à des résultats qu'il sera impossible de juger fiables ; ii) à proposer des solutions d'amélioration qui ne seront pas à la hauteur du renforcement requis pour garantir le niveau de sûreté exigé par les prescriptions réglementaires. Pour être exhaustif, nous avons présenté dans cet article l'ensemble des phases de l'étude, incluant les interventions retenues pour améliorer le comportement de l'immeuble en vue de satisfaire les exigences réglementaires.

## 5. Bibliographie

- P.C.M. 3274, *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni*, 2003.
- Legge 64, *Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*, 1974.
- DM 14-01-2008, *Testo aggiornato per le norme tecniche per le costruzioni*, 2008.
- UNI EN 1990, *Eurocode 0*, 1990.
- UNI EN 1991-1-1, *Eurocode 1 : actions sur les structures*, 1991.
- UNI EN 1996-1-1, *Eurocode 6 : règles générales pour la conception des structures en maçonnerie non armée*, 1996.
- UNI EN 1998-1, *Eurocode 8 : règles générales pour la conception parasismique*, 1998.
- UNI EN 1998-3, *Eurocode 8 : assainissement des bâtiments existants*, 1998.
- Gehl P., Monfort-Clement D., *Développement de surface de fragilité pour le bâti courant en maçonnerie*, Rapport finale, BRGM/RP-58906-FR, 2010.
- Milano L., Mannella A., Morisi C., Martinelli A., *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*, Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni, 2010.