
Vers une méthode de diagnostic de vulnérabilité sismique à grande échelle pour le patrimoine historique

Claire Limoge-Schraen

LMT-Cachan UMR 8535 - ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay - 61 avenue du Président Wilson
94230 Cachan, France ; claire.limoge@lmt.ens-cachan.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. La préservation du bâti ancien face aux risques naturels, notamment sismiques, pose de nombreuses difficultés. Les pays à risque sismique moyen, comme la France, souhaitent protéger ce patrimoine particulièrement sensible mais très nombreux. Notre travail cherche donc à répondre aux deux impératifs de la grande échelle ou du nombre très important d'édifices à diagnostiquer à l'échelle d'une région, et de l'analyse pertinente du comportement sous séisme de structures historiques maçonnées. Nous nous appuyons sur l'étude du patrimoine vernaculaire très riche constitué des églises et chapelles baroques des hautes vallées de Savoie française. Nous présentons d'abord les choix que nous avons faits et les outils que nous avons développés pour répondre aux impératifs identifiés. Puis nous développons comment nous avons utilisé des mesures sous bruit ambiant pour caler et valider des modèles de structures complexes peu connues. Enfin, nous expliquons comment nous avons défini un critère seuil d'endommagement en confrontant différentes approches, numériques et cinématique.

ABSTRACT. The preservation of architectural heritage against natural hazards, especially seismic risks, is extremely challenging. Countries presenting medium seismic risk, like France, want to protect this particularly sensitive but also numerous heritage. Our research work therefore seeks to meet those two requirements. First the large-scale of the study deals with a large number of buildings to be diagnosed across the region. Then the need to propose a relevant analysis of the seismic behavior of historic structures masonry, by inexpensive ways. We rely on studying the rich heritage of vernacular Baroque churches and chapels in the highest valleys of French Savoye. We first present the choices we have made and the tools we have developed to meet the identified requirements. Then we develop how we used ambient noise measurements in order to calibrate and validate initial models of unfamiliar complex structures. Finally, we explain how we defined a damage threshold criterion by comparing different approaches, numerical and kinematics.

MOTS-CLÉS : Patrimoine, maçonnerie, vulnérabilité sismique, mesures vibratoires, modélisation.

KEY WORDS: Heritage, masonry, seismic vulnerability, vibration testing, numerical modelling.

1. Diagnostic sismique du bâti historique : enjeux et points clés

La préservation du bâti ancien face aux risques naturels, notamment sismiques, pose de nombreuses difficultés que nous allons illustrer sur le patrimoine culturel des XVII^e et XVIII^e des Hautes vallées de Savoie. Ce baroque savoyard est né d'une période très active sur les plans politique, économique et religieux, conduisant à une multiplication des chantiers. Cette région est située dans la zone d'aléa sismique métropolitain maximum, zone 4, où l'accélération maximale de référence au rocher est de $a_g = 1,6\text{m/s}^2$.

Les pays à risque sismique moyen, comme la France ou la Suisse [KAR 14], souhaitent protéger leur patrimoine sensible. Il faut donc développer des méthodes adaptées aux zones à sismicité modérée, où la prise en compte systématique de ce risque pour le bâti existant est assez récente, avec peu de banques de données de dommages sur le terrain. De plus une vaste partie du patrimoine, c'est le cas ici, est constituée d'architectures vernaculaires en matériaux rustiques, souvent très peu entretenues. Ce bâti à risques contient aussi un très riche patrimoine mobilier et pictural, à protéger en sauvegardant leur contenant. D'autre part, la majeure partie des édifices historiques est en maçonnerie, matériau dont la caractérisation reste complexe même avec un investissement important [VAL 03]. Notons aussi que le diagnostic d'un patrimoine complet concerne nécessairement de très nombreux bâtiments. Il est donc impossible de les traiter tous un par un sans en ignorer arbitrairement. Enfin toute intervention sur un monument historique est soumise à des règles, même pour des tests, exigeant sa lisibilité, sa compatibilité et sa réversibilité (Charte de Venise, [ICO 03]). Le projet Perpetuate [LAG 12] a montré que les modèles numériques actuels, multi échelles ou non linéaires, ne pouvaient pas fournir d'analyse préventive d'un grand nombre de structures.

Afin de répondre à ces enjeux, nous cherchons à proposer une méthode d'analyse de vulnérabilité sismique à grande échelle. Cette méthode de diagnostic, basée sur la modélisation numérique par Éléments Finis (EF) de bâtiments historiques et leurs réponses vis-à-vis des séismes, s'appuie sur une hiérarchisation des niveaux de modélisation : modèle linéaire sur l'ensemble des édifices concernés, puis modèle non-linéaire plus détaillé dans le cas des structures ayant fait apparaître un niveau de risque marqué lors de l'analyse linéaire. Compte tenu des fortes contraintes soulignées ci-dessus, notre démarche doit donc répondre à deux impératifs principaux :

- Offrir une analyse pertinente du comportement sous séisme de structures historiques maçonnées
- Contenir le nombre de modèles numérique nécessaire au diagnostic d'un grand nombre de bâtiments

Les points suivants constituent, en conséquence, la trame de la stratégie retenue :

- Définir des typologies d'ouvrages permettant en première approche de travailler par groupe
- Définir les choix et hypothèses de modélisation adaptés aux spécificités du bâti étudié
- Définir les critères nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité des typologies étudiées

Nous expliciterons d'abord nos choix et les outils nous avons développés pour répondre à ces impératifs. Puis nous développerons comment nous avons calé et validé des modèles de structures complexes peu connues grâce à des mesures sous bruit ambiant. Enfin nous montrerons comment nous définissons un critère d'endommagement en confrontant approches numériques, linéaire et non linéaire, et analyse cinématique non-linéaire.

2. Choix stratégiques pour l'échelle d'étude: élaboration d'un classement typologique

Un travail en archive nous a permis de recenser les 198 chapelles et églises, bâties ou fortement modifiées entre 1615 et 1792, constituant le panel d'étude (Fig. 1). Pour fournir un diagnostic de tous ces bâtiments, il est donc impératif de définir des outils pertinents à cette échelle. [LOU 06] base sa méthode sur des indices géométriques. Mais on ne peut ainsi évaluer ni le niveau de dommage attendu ni le comportement de la structure sous séisme, informations cruciales pour un meilleur renforcement. Nous avons choisi d'utiliser les courbes de vulnérabilité, parfaitement adaptées à cette échelle. Cette approche probabiliste, utilisée sur des structures modernes comme sur des villes [PER 13], définit un niveau de dommage selon un critère global.

Ces courbes donnent des informations sur une catégorie donnée de structures aux mêmes caractéristiques structurelles, ce qui coïncide avec notre objectif de limiter le nombre de modèles. Nous avons procédé à une campagne de relevés sur tous les édifices et constitué une base de données [LIM 15]. En nous appuyant sur le code italien pour les monuments anciens [DPC 11] et l'eurocode 8, nous avons défini cinq critères structuraux de fragilité sous séisme: type de plan, présence d'une discontinuité entre la nef et le chœur, nombre et forme de la (les) nef(s), présence d'une tribune, forme du chœur. Selon leur combinaison nous pouvons classer tous les édifices du panel sauf deux églises uniques, en types structuraux homogènes: 8 types d'églises et 6 de chapelles.

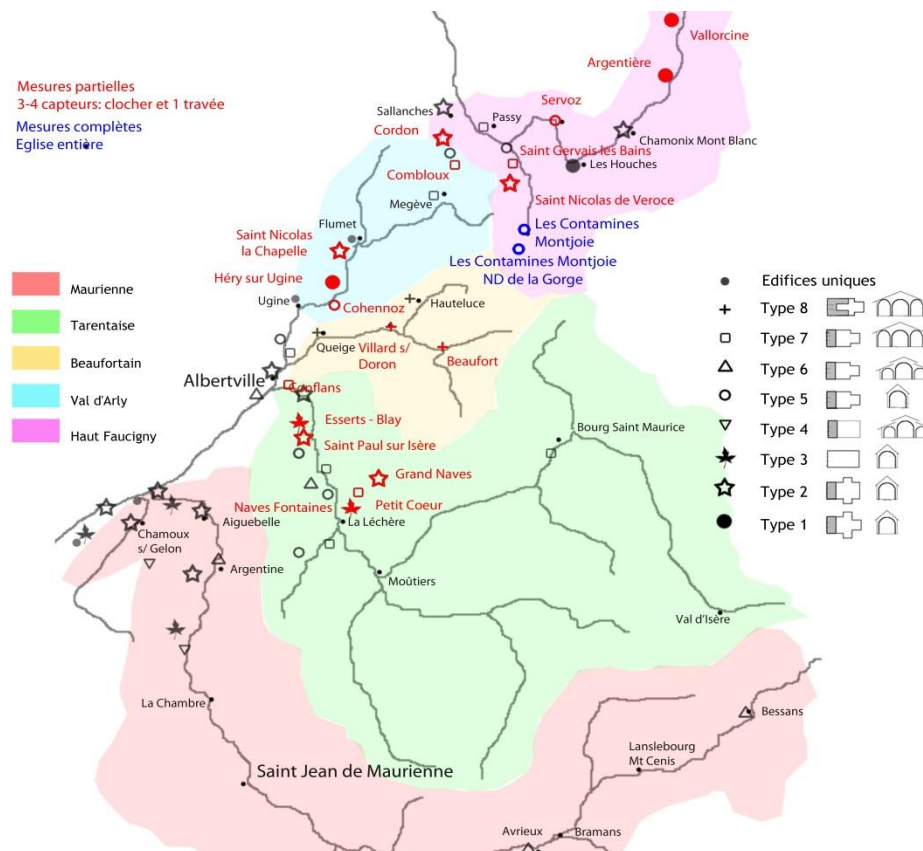


Figure 1. Carte des types structurels des 70 églises du panel étudié et mesures vibratoires réalisées

3. Maillage 3D des typologies identifiées et variabilité géométrique: MicMac et préprocesseur

Nous utilisons le code éléments finis Cast3M pour les études numériques. Compte tenu du nombre important de structures à modéliser, nous avons besoin de construire aisément le maillage de bâtiments complexes mais aussi d'en faire varier les caractéristiques par type structurel, pour tenir compte des différentes géométries et implantations. Ces variations autour du modèle de plus représentatif de chaque type sont cruciales pour les études de vulnérabilité. Nous avons donc développé un préprocesseur pour cast3M qui répond à ces exigences, (Fig2). En l'absence de plans détaillés, il se base sur les relevés photogrammétriques effectués in situ à l'aide d'un appareil photo numérique Canon 50D, d'objectifs 16 et 50mm et du logiciel MicMac de l'IGN.

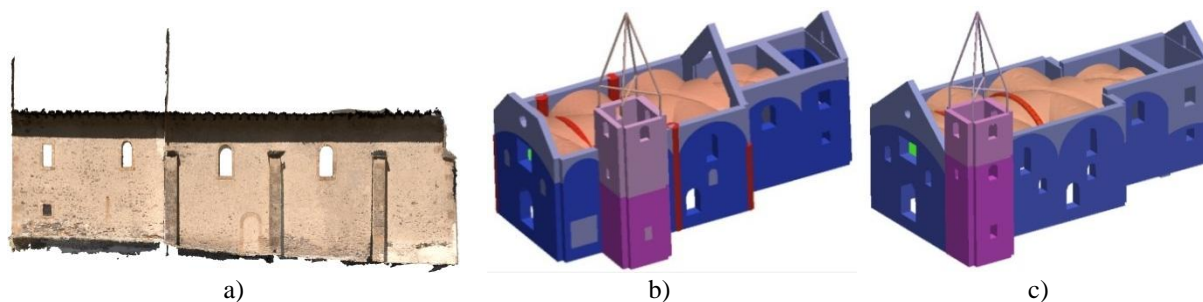


Figure 2. Notre-Dame de la Gorge : a) relevé de façade MicMac initial, b) maillage Cast3M et ses sous-structures, c) variation sur le même type structurel pour un autre maillage Cast3M

4. Hypothèses de modélisation : éléments spécifiques

S'agissant d'une maçonnerie de blocage très grossière, fortement hétérogène, plus isotrope à grande échelle qu'une maçonnerie appareillée présentant des directions de fissuration privilégiées, nous utilisons une macro-modélisation, sur des éléments plaques. Ceci allège le modèle et la construction des maillages paramétrés. Les caractéristiques mécaniques des modèles initiaux linéaires sont tirées de la littérature ([BIN 00], [DPC 11]).

La géométrie et la mise en œuvre des édifices nécessitent de faire des hypothèses, parfois complexes, et de contrôler au mieux leurs domaines de validité afin d'aboutir à une modélisation simplifiée mais pertinente quant à la nature des résultats à obtenir. Nous avons identifié trois zones qui concentrent les possibilités de variation les plus importantes : fondations, voûtes et charpente [LIM 15]. Une étude paramétrique des différents choix de modélisations nous a permis d'en quantifier l'impact sur les résultats en terme de rigidité, déformées modale et fréquences propres. Nous avons pu ainsi déterminer, en fonction du types de structure, les hypothèses de modélisation les plus appropriées. Pour une église sur une pente comprise entre 15 et 30 %, les fondations sont modélisées par un encastrement de la ligne de séparation entre le sol et les fondations; la charpente et la toiture par des masses linéaires et ponctuelles; enfin les voûtes sont modélisées explicitement. De plus, afin de prendre en compte les spécificités matériaux et géométriques des macroéléments, nous avons divisé chaque bâtiment en sous-structures. Notre-Dame de la Gorge (Cf. Fig.2b) est ainsi décrite par trois catégories de murs d'épaisseurs variées, un ensemble de pilastres, contreforts et arcs doubleaux modélisés en éléments poutres, la tribune au mode constructif particulier, la base du clocher dont la maçonnerie est plus appareillée, les voûtes avec leur calage poids.

5. Validation du modèle numérique par mesures in-situ

Depuis une dizaine d'année, les mesures sous bruit ambiant pour enregistrer les caractéristiques vibratoires d'une structure se développent, notamment pour des édifices élancés tels les clochers, tant pour du diagnostic ponctuel que du suivi [RAM 10]. Le principe de l'analyse modale opérationnelle est d'extraire les paramètres modaux (fréquences propres, amortissements et déformées modales) d'une structure à partir des enregistrements de ses vibrations. Puis on minimise l'écart en fréquence et/ou en déformée entre le modèle numérique initial et les informations expérimentales par jeu sur les variables inconnues. Les paramètres ajustés peuvent être géométriques - conditions aux limites, épaisseurs - ou mécaniques - module d'Young (E), masse volumique (ρ). Nous avons utilisé cette méthode sur nos bâtiments complexes aux nombreuses inconnues mécaniques et géométriques. Après des mesures vibratoires in situ, nous avons mis en place une méthode de calage progressif du modèle numérique initial. Partant de mesures partielles sur un macroélément pour en définir les paramètres les plus simples, nous avons découpé les parties de la structure présentant des modes très différents pour les caler avec des paramètres propres plus nombreux, avant de réassembler le tout pour un calage final global.

5.1. Mesures de vibrations sous bruit ambiant

Nous avons instrumenté vingt églises de six types structurels (Fig1), avec P. Gueguen du laboratoire IsTerre, soit partiellement par deux jeux de mesures dans le clocher et la nef, soit entièrement par une trentaine de capteurs sur quatre niveaux (Fig4). Ce sont les édifices les plus représentatifs de leur type structurel, répartis dans la zone d'étude, en évitant les situations trop particulières. Cette technique de mesure est bien adaptée aux monuments anciens : non destructive, elle est aussi peu coûteuse en temps (30 minutes par jeux de mesures en moyenne), comme en main d'œuvre. Il est donc envisageable de la généraliser à un panel étendu de structures.

Les sollicitations sont constituées des vibrations ambiantes : sollicitations quasi stationnaires comme les conditions météorologiques ou les activités humaines, ou mouvements transitoires naturels ou anthropiques. Elles sont assimilées à un bruit blanc dans la bande 0.5–20 Hz, pertinente pour des bâtiments. L'équipement de l'IsTerre fonctionne sur batteries et est portable, donc approprié à de grands édifices parfois isolés. Nous avons utilisé 4 vélocimètres 3D LE-3Dlite MkIII, très sensibles dans la bande 0,4-25Hz, peu bruités, limités en amplitude. Ils sont juste posés sur la structure testée. Le numériseur est une station Cityshark II, bas bruit, avec une amplitude de saturation suffisante pour les vibrations ambiantes. Pour l'analyse modale opérationnelle, nous avons utilisé la méthode Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) qui permet de décomposer les modes et de calculer leur amortissement en utilisant le Modal Assurance Criterion (MAC), outil de comparaison entre deux déformées. Le principe de cette méthode est de décomposer les matrices de densités spectrales en degrés de liberté indépendants grâce à la décomposition en valeurs singulières (SVD) [PER 13].

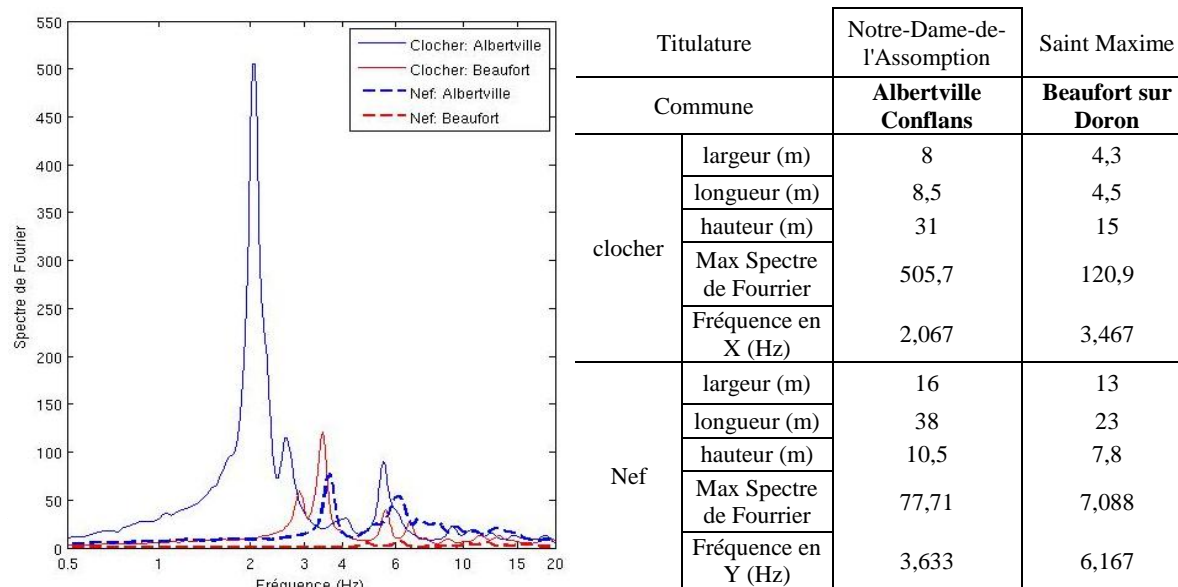


Figure 3. Clocher et nef des églises Saint Maxime de Beaufort (type structurel 8) et Saint Grat d'Albertville-Conflans (type structurel 7) : Comparaison des spectres de Fourier - Dimensions.

5.2. Mesures partielles sur clochers : évaluation des caractéristiques mécaniques

Le clocher est un macro-élément plus simple à modéliser car le nombre d'inconnues est moins important. De plus les mesures sous bruit ambiant sont particulièrement performantes pour ce type d'ouvrage [IVO 06]. En considérant les caractéristiques matériaux comme des variables à optimiser pour caler le modèle en fréquence, on peut déterminer une gamme de caractéristiques mécaniques moyennes adaptée à la région [RUS 10]. Nous avons choisi de mesurer E et ρ en les utilisant comme paramètres d'optimisation. Pour effectuer cet ajustement, la fonction erreur, à partir des fréquences en X et en Y mesurées (exp) et calculées (num), est la suivante:

$$Err_{tot} = \sqrt{\frac{(FX_{exp} - FX_{num})^2}{FX_{exp}^2} + \frac{(FY_{exp} - FY_{num})^2}{FY_{exp}^2}}$$

La minimisation de cette fonction par variation des paramètres matériaux nous permet de déterminer les caractéristiques optimales. Pour cela nous utilisons l'outil GRENAT développé au LMT, basé sur un algorithme génétique. Avec n paramètres, le nombre d'essai est de l'ordre de 2^n , d'où l'intérêt de réduire n . Cette étape nous a permis de conclure que la méthode de calage était performante, utilisable sur une structure complète. De plus :

- Sur cinq modélisations différentes d'un même clocher, avec les mêmes paramètres matériaux, les différences en fréquence dépassent 25 %. Ceci montre l'importance de la définition du modèle EF initial, notamment pour décrire l'interaction clocher/nef et prendre en compte le bulbe et les cloches.
- Nous avons pu définir des valeurs de E et ρ adaptées à la maçonnerie de cette région et à chaque édifice grâce au calage en fréquence des 17 modèles de clochers, avec moins de 5 % d'erreur sur chaque.
- Nous pouvons valider les types structurels définis (Cf. Fig. 1) car on distingue 3 catégories de structures semblables dans leur rapport E/ρ /hauteur : bâtiments riches, vallée de Chamonix et types 1-7 ; bâtiments plus pauvres de construction homogène, Beaufortain et types 5-8; structures pauvres, Tarentaise, types 2-3.

5.3. Mesures complètes : calage et identification des modèles numériques

L'église Notre Dame de la Gorge, construite de 1699 à 1701, est de type 5 (Fig. 1 et 4). Les archives nous révèlent trois modifications structurelles importantes au cours de son histoire: fin XIXe, modification du clocher et de baies dans la nef et la sacristie; 1990 et 2012, réfection lourde de la charpente et de la couverture, reprise des décors. Des fissures sont à nouveau visibles (Fig. 4). La maçonnerie grossière présente une importante proportion de mortier et des pierres très irrégulières. Aucun appareillage n'est visible, sauf à la base du clocher.

Notons que la matrice AutoMAC des mesures expérimentales permet de définir la qualité des valeurs MAC à viser : elle montre que certains modes locaux ne sont pas enregistrés, comme l'oscillation du fronton du mode 1 numérique, bien apparié en fréquence avec le mode 1 expérimental, mais mal en déformée faute de capteur.

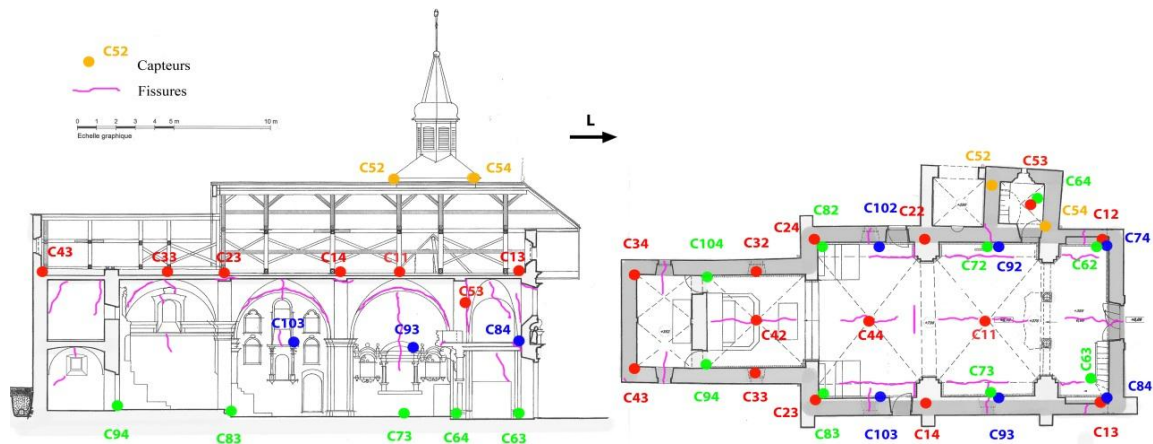
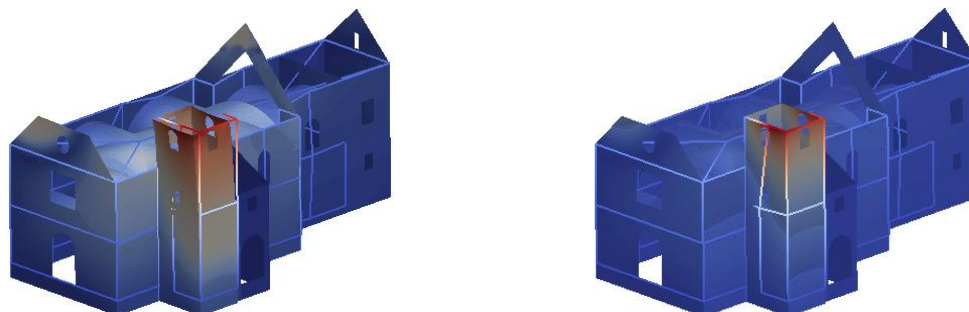


Figure 4. Plan et coupe avec relevés des fissures (MicMac) : position des capteurs

Les résultats du modèle sans optimisation sont illustrés en Fig. 5a. La valeur du critère MAC de 0,65 sur les 4 premiers modes montre une très mauvaise corrélation : manque de donnée sur le sol ou les fondations... L'erreur en fréquence dépasse 15 % : la maçonnerie des façades est de moins bonne qualité que celle des clochers prise en référence, incertitudes sur la masse du toit... De plus, le critère MAC est sensible aux valeurs extrêmes qui faussent les résultats du bâtiment entier. On a donc décidé d'optimiser la nef et le clocher séparément.

Nous avons procédé à ces optimisations découplées en trois étapes. Nous tenons compte de la partie manquante en complétant la matrice de rigidité de chaque modèle par des appuis aux points de jonction. Leur légèreté permet d'augmenter le nombre de paramètres : représentation des fondations par des appuis à calibrer et prise en compte des différents types de maçonnerie dus au mode constructif et aux travaux successifs. En passant de 3 à 35 paramètres sur le clocher, la valeur MAC moyenne passe de 0,5 à 0,92, ce qui nous permet de montrer l'importance du choix des paramètres car leur multiplication n'est pas acceptable. Elle rend l'optimisation de plus en plus coûteuse tout en étant trompeuse puisqu'on ne pourra pas contrôler in-situ les valeurs finales. On a donc procédé ensuite à une analyse de sensibilité sur tous les paramètres possibles pour la nef (100) et le clocher (52), dans les plages de valeur du code italien et de la littérature. Les modules d'Young et les rigidités d'appuis présentent la densité la moins importante, nous amenant à conserver les valeurs de l'optimisation des clochers et du code italien. Enfin, on a testé sur un modèle de nef et de clocher six fonctions erreur différentes, combinant la valeur du critère MAC et l'erreur en fréquence. Ces deux indicateurs par mode varient jusqu'à 35 % en fonction du choix. Il faut donc adapter la fonction à ce que l'on connaît le moins dans la structure à caler. Pour le modèle clocher on donnera plus de poids au MAC car les fréquences sont pertinentes, tandis que de mauvaises déformées seraient très préjudiciables pour le MAC général.

Une fois les deux modèles recalés séparément, on les assemble en un modèle unique grâce à des rigidités calibrées sur celles représentant la partie absente des modèles découplés. De cette façon, l'optimisation du modèle complet à 36000 degrés de liberté est effectuée avec un seul paramètre, tandis que les optimisations à plusieurs contraintes ont été faites sur les modèles partiels. Le critère MAC final sur les 4 premiers modes varie de 0,99 à 0,90, montrant une très bonne corrélation. L'erreur en fréquence varie de 0 à 9 %, pour une moyenne de 5,4%. Les résultats sont donc très satisfaisants (Cf. Fig 5b), surtout s'agissant d'un tel édifice.



a) Fréquence num : 4,52 Hz – MAC : 0,64

b) Fréquence num : 5,85 Hz – MAC : 0,97

Figure 5. Notre-Dame de la Gorge : 3^e mode, flexion en Y avant/après optimisation. Fréquence exp=5,99Hz

6. Définition d'un critère d'endommagement

Les courbes de vulnérabilité nécessitent des critères seuils, déterminant le niveau d'endommagement atteint par la structure. Les critères globaux utilisés pour les édifices modernes (déplacement inter-étages) ne sont pas utilisables pour ces structures. On a donc testé des critères de rupture locaux basés sur les contraintes principales, pour en tirer des critères cinématiques plus globaux. Nous présentons ici les résultats obtenus pour le critère de résistance en traction, avec $\sigma_t = 1E6Pa$. Les calculs sont menés à partir des spectres EC8 : bâtiments de classes 4 et 3, zone de type II, sol de catégorie B, coefficient d'amortissement 5%. L'accélérogramme est celui d'Irpinia, fourni par le Réseau Accélérométrique Permanent, ajusté au spectre cible. On confronte ensuite les résultats numériques aux informations concernant les mécanismes de rupture par macroélément de l'analyse cinématique.

6.1. Modèle numérique linéaire

Chaque maille où le critère est violé est stockée dans un maillage que l'on compare ensuite aux relevés de dommages sur les structures les moins entretenues du panel, aux photographies d'archive et aux codes italiens. On y retrouve des mécanismes de dégradation structurel de la maçonnerie sous séisme: poussée du toit, déversement des murs gouttereaux, fissuration verticale et déversement de la façade. Toutefois ces observations doivent être confirmées par d'autres méthodes : la pertinence des conclusions du modèle linéaire au-delà du seuil élastique n'est pas vérifiée, et ces structures sont soumises à d'autres sollicitations telles que des glissements de terrain qui pourraient provoquer des dommages visibles sur les photos mais sans rapport avec des séismes.

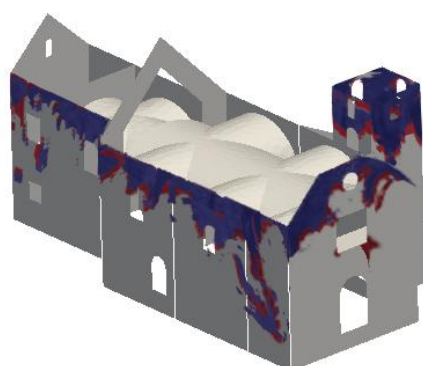
6.2. Modèle numérique non-linéaire

Le modèle non-linéaire d'endommagement continu utilisé ici [FAR 98], a été développé pour de grandes structures en béton armé. Il fait l'hypothèse d'un matériau homogène et isotrope à l'échelle de la structure. Il est basé sur deux variables d'endommagement, une en traction, l'autre en compression, et un tenseur de déformation pour caractériser les mécanismes de dégradation non-linéaires de la maçonnerie. Silva [SIL 12] montre que ce modèle permet, à l'échelle de la structure, une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement.

La Fig. 6 présente les zones (sauf les voûtes par soucis de lisibilité) où les contraintes principales en traction des modèles linéaire et non-linéaire projetées sur un même plan, dépassent le critère: murs gouttereaux de la nef soumis à des sollicitations hors plan, frontons des deux façades d'extrémité. Similaires, elles sont toutefois plus étendues dans le modèle non-linéaire car il prend en compte l'accumulation progressive de contraintes.

6.3. Analyse cinématique linéaire et non-linéaire

De nombreux auteurs [CAS 06] s'accordent sur le fait que des modèles complexes ne sont pas l'assurance de résultats clairs et fiables. Pour les structures comme les églises, le code italien préconise l'analyse cinématique linéaire voire non-linéaire [DPC 11]. Les églises sont divisées en parties présentant des comportements distincts sous séismes, conduisant à des mécanismes de ruptures répertoriés, 28 au total. Macroélément par macroélément, on détermine tous les mécanismes de rupture possibles dans l'église étudiée. Puis, cas par cas, on calcule la valeur de l'accélération horizontale qui déclenche le mécanisme, en relation avec l'état d'endommagement limite possible. Cela permet de définir l'action horizontale que la structure peut progressivement supporter au cours de l'évolution du mécanisme. En comparant l'accélération à celle du site, on peut déterminer les mécanismes possibles. Pour l'église Notre Dame de la Gorge, un déversement de la façade principale est à craindre (Fig6) : ces mécanismes ne sont vérifiés ni par l'analyse linéaire ni par l'analyse non linéaire.



Mécanismes envisagés	accélération ultime (m/s ²)	accélération exigée (m/s ²)	Mécanisme possible
Déversement du fronton	1,57	2,12	oui
Déversement des parties supérieures plus minces	0,747	0,962	oui
Rotation de la façade avec arrachement des angles	0,486	1,152	oui

Figure 6. Notre-Dame de la Gorge. Zones où SIII dépassent le critère : modèles non-linéaire (rouge) et linéaire (bleu) - Analyse cinématique, façade principale : accélérations ultime et du site des mécanismes.

Si nous comparons les différents résultats portant sur Notre Dame de la Gorge, nous voyons que les zones où la résistance en traction et en cisaillement de la maçonnerie est dépassée, selon notre définition des seuils, correspondent bien aux mécanismes locaux d'endommagement de l'approche cinématique, puisque les fissures en biais sur le mur gouttereau (Fig. 4 et 6) correspondent bien à un déversement de la façade principale (Fig. 6).

7. Conclusions et perspectives

On a procédé au recensement et au relevé d'un patrimoine vulnérable souvent méconnu, constituant ainsi un panel d'étude cohérent et étendu. On a mis au point une méthode de construction de modèles simples, grâce à la définition de types structuraux validés expérimentalement, à la création d'outils pour un maillage totalement paramétré d'édifices complexes et à une étude d'impact des choix de modélisation dans trois zones clés. On a proposé une méthode simple pour caler un grand nombre de modèles de bâtiments différents sur des mesures vibratoires à partir de peu de données et les valider expérimentalement. On a proposé des critères d'endommagement en contrainte basés sur la première étape de modélisation en linéaire, puis on les a testés sur un modèle non-linéaire. On a enfin comparé les résultats des modélisations EF à ceux de l'analyse cinématique communément admise, ce qui nous a permis de montrer que leurs conclusions sont en bon accord actuellement.

Nous commençons maintenant à construire les courbes de vulnérabilité en tenant compte de la variabilité du signal sismique et de la géométrie au sein d'un type structurel. L'étape suivante sera l'élaboration des étages suivants de la méthode hiérarchisée, par passage à des modèles plus raffinés avec un modèle non-linéaire dans les zones de dommages potentiels et des tests de renforcement.

8. Bibliographie

- [BIN 00] BINDA L, TIRABOSCHI C, TONGINI FOLLI R. On site and laboratory investigation on materials and structure of a bell-tower in *Monza Int. Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und baudenkmalpflege* 2000;6(1): 41–62.
- [CAS 06] CASARIN, P. Structural assessment and seismic vulnerability analysis of a complex historical building. University of Trento, 2006
- [DPC 11] DPCM. Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle NTC 14 gennaio 2008. DPCM 9 febbraio 2011, G.U.R.I. February 26th 2011, Roma, Italy.
- [FAR 98] FARIA, R.; OLIVER, J. & CERVERA, M. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35, 1533 - 1558
- [ICO 03] ICOMOS, « Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage », 14th General Assembly of ICOMOS, Victoria Falls, 2003
- [IVO 06] IVORRA S, PALLARÉS FJ. Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower. *Eng Struct* 2006;28:660–7.
- [KAR 14] KARBASSI, A., AND LESTUZZI P. Seismic risk for existing buildings in Switzerland – development of fragility curves for masonry buildings, EPFL, Lausanne, Switzerland, FOEN, (2014) 56 p.
- [LAG 12] LAGOMARSINO S, CATTARI S, CALDERINI C, European Guidelines for the seismic preservation of cultural heritage assets, PERPETUATE (EU-FP7 Research Project), Deliverable D41, 2012
- [LIM 15] LIMOGÉ C, GIRY C, DESPREZ C, RAGUENEAU F, Toward a large-scale seismic assessment method for heritage building: Vulnerability of masonry baroque churches, *EJECE*, Special Issue AUGC 2014
- [LOU 06] LOURENÇO. P.B. & ROQUE. J.A., « Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings », *Construction and building materials*, 20 (2006) 200–208
- [PER 13] PERRAULT M, Évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments à partir de mesures in situ, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013
- [RAM 10] RAMOS LF, MARQUES L, LOURENÇO PB, DE ROECK G, CAMPOS-COSTA A, ROQUE J. Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis. *Mech Syst Signal Process* 2010;24(5):1291–305.
- [RUS 10] RUSSO G, BERGAMO O, DAMIANI L, LUGATO D. Experimental analysis of the “Saint Andrea” masonry bell tower in Venice. new method for the determination of “tower global Young’s Modulus E”. *Eng Struct* 2010;32:353–60.
- [SIL 12] SILVA, B.; GUEDES, J. M.; ARÊDE, A. & COSTA, A. Calibration and application of a continuum damage model on the simulation of stone masonry structures: Gondar church as a case study *Bull.Earthq. Eng.*, 2012, 10, 211-234
- [VAL 03] VALLUZZI MR, DA PORTO F, MODENA C. Structural investigation and strengthening of the Civic Tower in Vicenza. *Proc of Structural Faults and Repairs*, London UK: 2003.