



HAL
open science

Simulation du bâti ancien à partir de reconstruction virtuelle et modélisation.

Marc Vinches, Ali Rafiee, Claude Bohatier

► **To cite this version:**

Marc Vinches, Ali Rafiee, Claude Bohatier. Simulation du bâti ancien à partir de reconstruction virtuelle et modélisation.. VIIIèmes rencontres européennes du groupe APS & journée technique AFPS, Dec 2008, Manosque, France. hal-04609892

HAL Id: hal-04609892

<https://imt-mines-ales.hal.science/hal-04609892v1>

Submitted on 13 Jun 2024

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.

Simulation du bâti ancien à partir de reconstruction virtuelle et de modélisation.

Marc VINCHES*, Ali RAFIEE**, Claude BOHATIER***

*: *Pôle Génie Civil, Centre des Matériaux de Grande Diffusion, Ecole des Mines d'Alès, 6 avenue de Clavières, 30319 ALES CEDEX.*

** : *University of Zanjan, University boulevard, PO Box 313, 45371-38111, Iran*

***: *Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UM5 5508, Université Montpellier II, CC048, Place Eugène Bataillon, 34095 MONTPELLIER CEDEX 5*

Résumé

On présente certains résultats obtenus au cours de trois thèses (Brahim Chetouane, Robert Péralès, Ali Rafiee) co-encadrées entre le LMGC et le CMGD, en utilisant le logiciel LMGC90 après avoir transféré la modélisation géométrique de monuments anciens définie dans le logiciel de CAO AUTOCAD®. Un certain nombre de problèmes soulevés, et résolus, ont permis de progresser dans la modélisation, en participant au développement du logiciel. Des analyses sont présentées concernant des résultats particuliers, conduisant à définir ce que pourrait être un outil de modélisation et de simulation pour le bâti ancien en pierre.

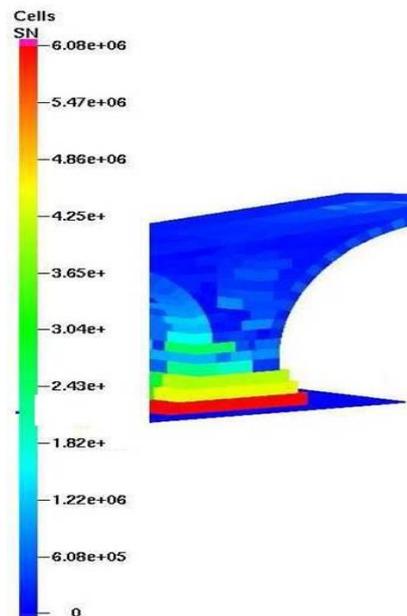
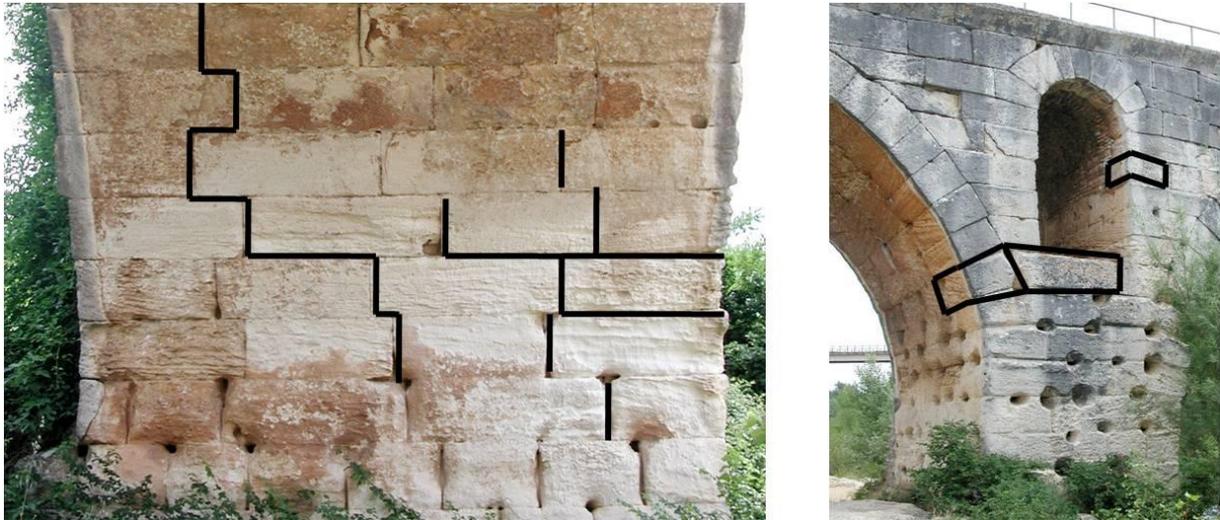
Ce type de bâti en maçonnerie est généralement composé d'éléments de formes géométriques simples : prismes majoritairement parallélépipédiques ou éléments axisymétriques voire facétisés dans le cas de colonnes. Ces modèles géométriques peuvent être élaborés le plus souvent à partir de techniques élémentaires de CAO. Les contacts sont généralement persistants entre les blocs de pierre, dans le cas contraire il peut s'agir une situation de destruction sous séisme ou sous affaissement de fondation. En conséquence, des recherches concernant la modélisation des liaisons ont été développées pour s'adapter au problème spécifique de la construction de structures en pierre massive.

Introduction

A la suite de la publication des résultats des fouilles conduites sur les ponts-aqueducs du Vallon des Arcs à Fontvieille, Leveau(1995), l'apport de la modélisation mécanique d'édifices en grand appareil a été jugé important, de façon à tester diverses hypothèses ayant pu conduire à la ruine de ces ouvrages. Les premières applications à ces ouvrages de la méthode de la dynamique des contacts non-réguliers ont donné des résultats encourageants (Chétouane *et al.* (2005), (2008), Bohatier (2005)). Lors de ces travaux, il est apparu nécessaire d'intégrer la géométrie tridimensionnelle des blocs de pierre constituant les ouvrages, de façon à en déduire un report de charge mécaniquement réaliste (Vinches et Chétouane (2004)).

Les travaux poursuivis par Robert Pérales sur la prise en compte dans le logiciel LMGC90 d'une épaisseur de liant entre les blocs de pierre ont aussi concerné la détermination de la transmission correcte des efforts de liaison dans le cas de contacts plans, (Perales *et al.* (2007)) Une application

sur le Pont Julien, modélisé comme un assemblage d'éléments tridimensionnels rigides donne une illustration des résultats obtenus sur la non homogénéité des descentes de charge, figure 1, du fait notamment de l'appareillage particulier des pierres, en trois dimensions (Pérales (2007)). Une autre illustration sur les aqueducs du valon des Arcs a été présentée dans Pérales *et al.* (2008).

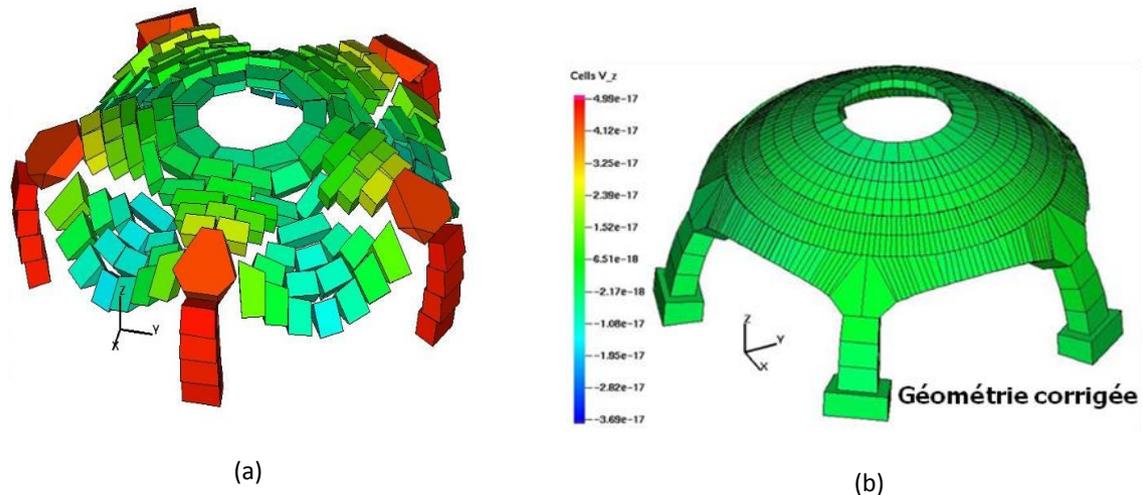


[Fig. 1] Visualisation des efforts verticaux s'appliquant sur les éléments de pierre du Pont Julien. Le grand appareil modélisé est calé, en 3D, sur des analyses de photos et des mesures *in situ*.

Prise en compte de géométries tridimensionnelles et de sollicitations dynamiques plus réalistes

Les améliorations sur la détermination des contacts actifs entre plans en trois dimensions, et la mise en œuvre de groupes d'éléments géométriques convexes de façon à pouvoir modéliser des corps rigides concaves ont permis de calculer la stabilité de structures plus complexes. La coupole de Junas a ainsi été étudiée par Ali Rafiee (Rafiee, 2008) permettant une étude paramétrique de sa stabilité.

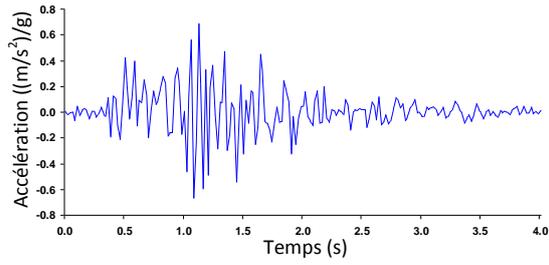
Les paramètres pris en compte sont l'angle de frottement entre les blocs de pierre, entre les blocs et le massif de fondation, l'existence ou non de cohésion entre les blocs, de façon à simuler la présence d'un éventuel mortier de liaison. La figure 2, présente deux modèles de la coupole: à gauche un modèle de 175 polyèdres convexes, simplification abusive de la géométrie initiale des blocs telle que conçue par Monsieur DELTOUR, à droite 850 polyèdres permettant une représentation plus réaliste des géométries des blocs, par regroupement de plusieurs convexes en un seul élément concave.



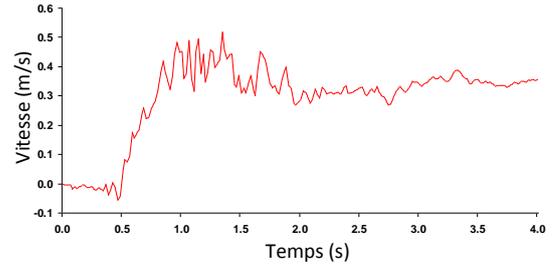
[Fig. 2] Coupole de Junas : prise en compte de géométries 3D plus réalistes
 (a) modèle ne comportant que des blocs convexes, (b) modèle avec des blocs concaves
 d'après (A. Rafiee (2008)).

On notera que, dans ce type de modèle, la prise en compte de lois de comportement de joints avec adhésion, et pas seulement du frottement sec de type Coulomb, est possible (Rafiee *et al.*, 2008(a)). Les derniers développements effectués ont permis de prendre en compte dans la modélisation des accélérogrammes de séismes réels, à partir d'enregistrements disponibles. A titre d'illustration, la figure 3 suivante, extraite de Rafiee *et al.*, 2008(b), présente le spectre du tremblement de terre de Zanjiran, en Iran, du 20 Juin 1994, d'une magnitude d'environ 6,1 Mb. Il a été appliqué à diverses arches, figure 4, et à un modèle 3D de l'aqueduc d'Arles, reprenant la géométrie de l'ouvrage reconstruit au II^e siècle, d'après Leveau, (1995), voir figure 5.

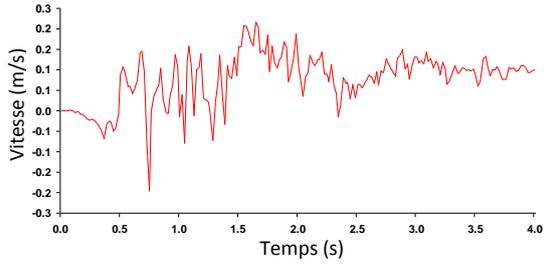
Une synthèse de la prise en compte de géométries 3D réalistes, et de sollicitations telles que mesurées sur des accélérogrammes de séismes réels, est illustrée sur la figure 6. On y notera notamment l'influence du harpage des moellons, sur les figures 6(b) et 6(c) notamment. L'angle de gauche, non harpé, est ruiné bien plus rapidement que celui de droite (harpé). On notera aussi l'effet de liaison des poutrelles assurant un certain contreventement des façades, en début de sollicitation.



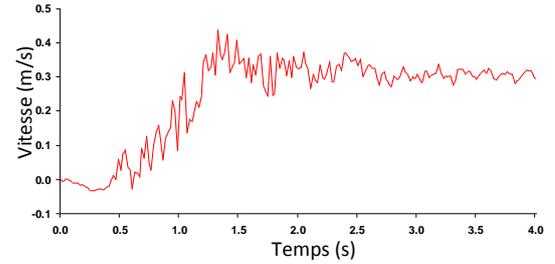
(a)



(b)

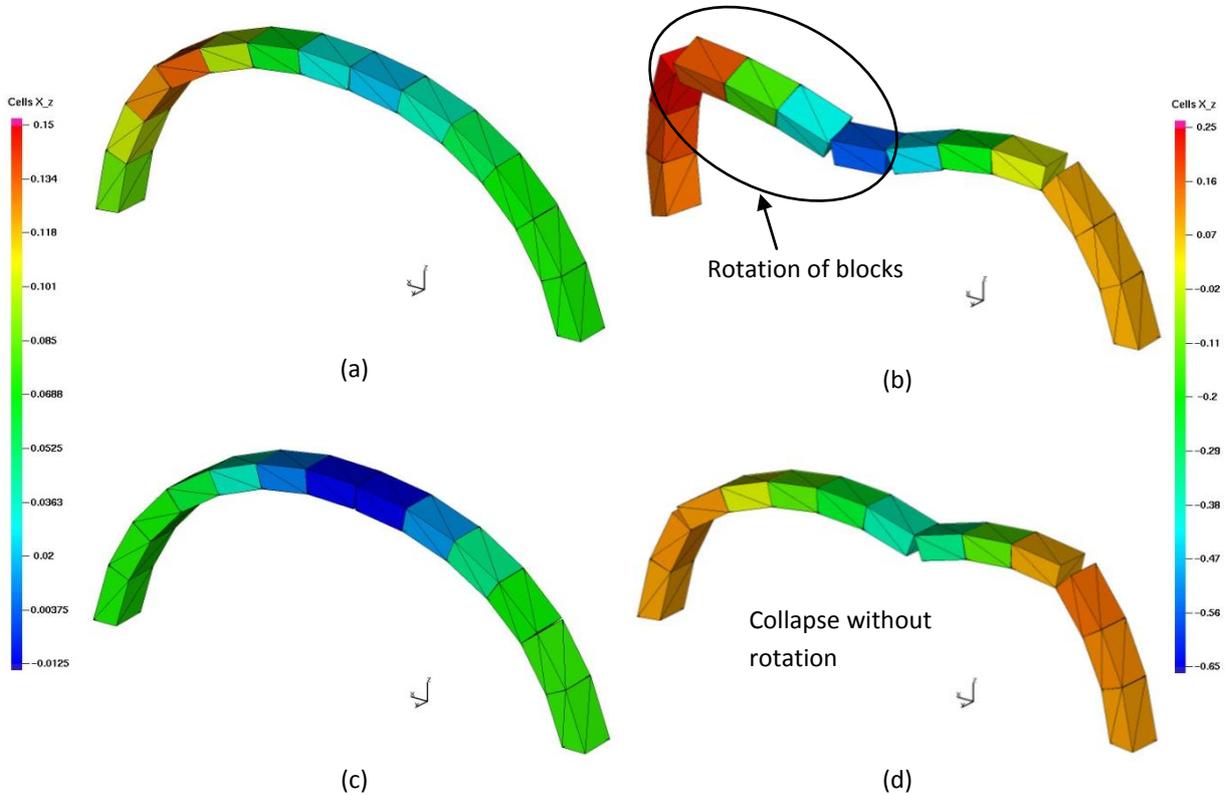


(c)

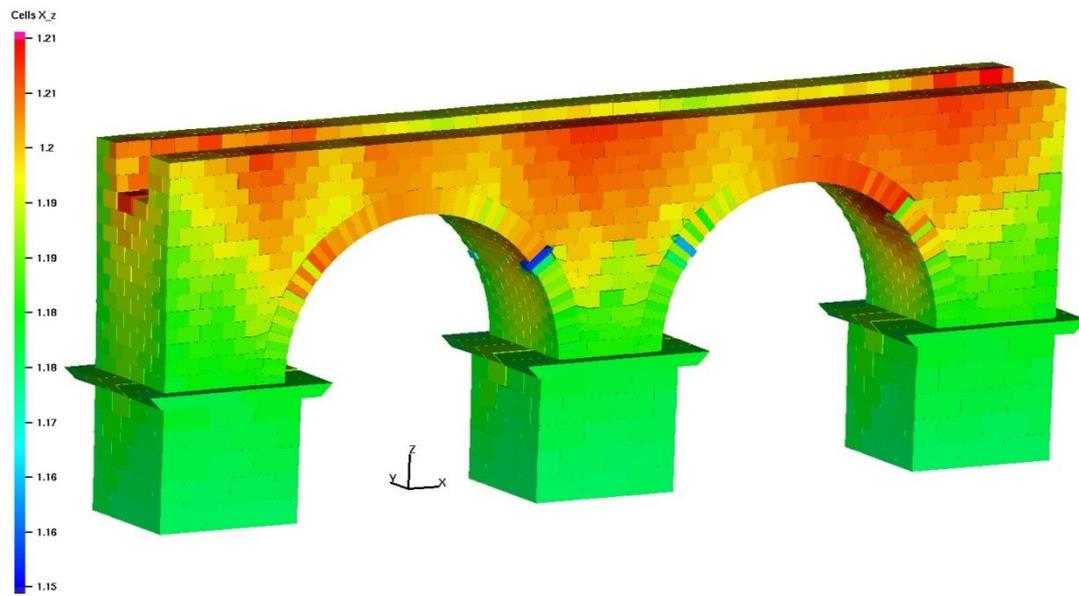


(d)

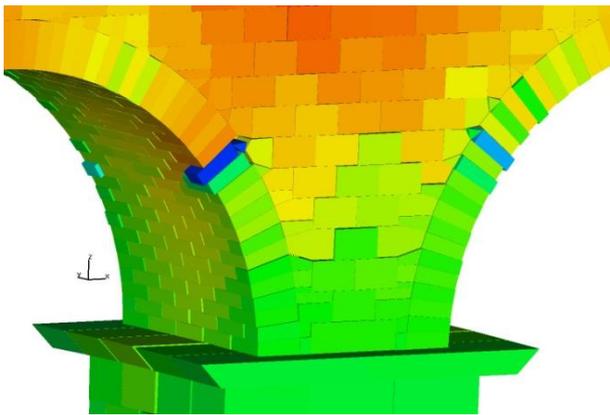
[fig. 3] Accélérogramme du tremblement de terre de Zanjiran : (a) accélération verticale du terrain, exprimée en g ($9,81 \text{ m/s}^2$), (b) vitesse verticale au sol (m/s), direction Z, (c) vitesse horizontale (m/s) dans la direction de X, horizontale perpendiculaire au plan de coupe (d) vitesse horizontale (m/s) dans la direction de Y, présentée Figure 4. (d'après Rafiee *et al.*, 2008(b))



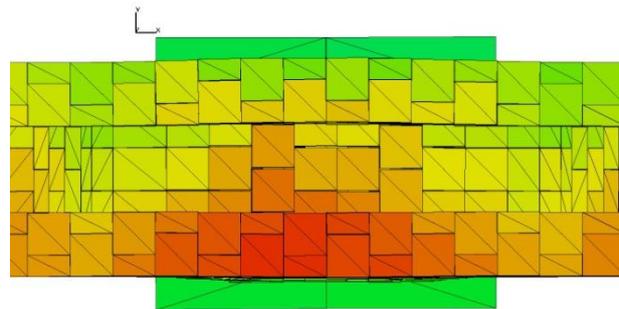
[fig. 4] Modèle de comportement d'arches sous sollicitation sismique réaliste (d'après Rafiee *et al.*, 2008(b))



(a)

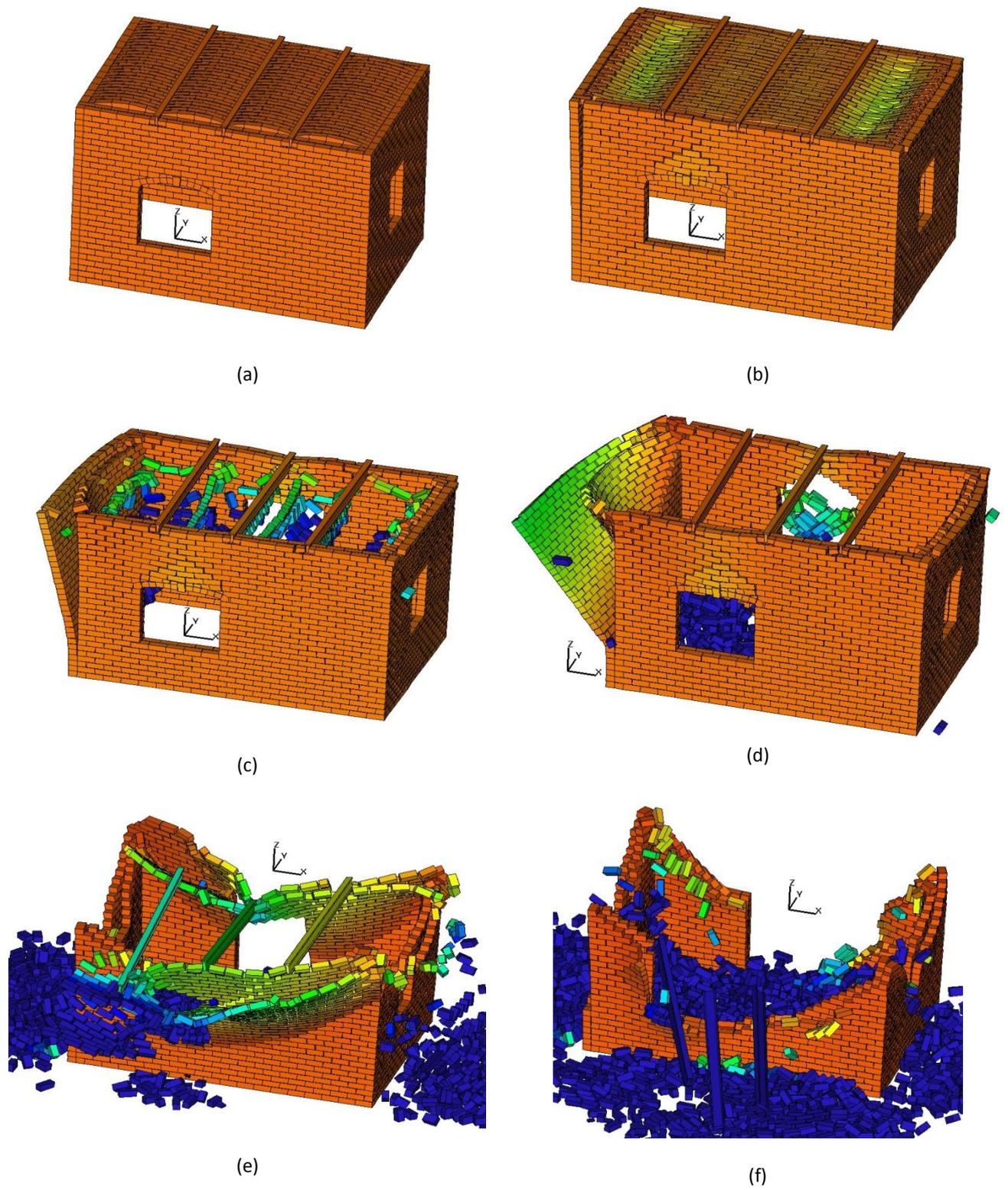


(b)



(c)

[fig. 5] Modèle 3D rigide, les déplacements verticaux (en mètre) à la suite de quatre secondes des vibrations sismiques réelle (a) au bout de quatre secondes, (b) vue rapprochée sur l'arche centrale (c) vue de dessus du pilier central.
(extrait de Rafiee, (2008))



[fig 6] Etapes successives de la ruine sous séisme, d'un habitat traditionnel en moellons, poutrelles et voutins de briques.

Conclusion

La méthode dynamique des contacts non-réguliers, plus connue sous le nom «Non-Smooth Contact Dynamics method», sur laquelle est basé le logiciel LMG90[®] utilisé dans l'ensemble des modélisations mécaniques présentées, permet de considérer le comportement de collections de solides rigides, éventuellement concaves, soumis à des sollicitations dynamiques et comportant plusieurs milliers de blocs.

La prise en compte de lois d'adhésion, et de frottement de Coulomb, est possible. On peut également dans de tels modèles simuler de la précontrainte entre divers éléments.

Des développements sont en cours pour gérer le comportement de solides déformables, en trois dimensions, ce qui permet d'avoir accès localement à des niveaux de contraintes dans les éléments discrets constituant la structure, et permettra, à terme, de simuler l'apparition de zone endomagées, ou fracturées dans ces éléments, sous sollicitation sismique réaliste.

Bibliographie

Bohatier *et al.*, 2005

Bohatier C., Chetouane B., Vinches M., ***Dynamic effects in stress analysis for discrete elements modeling Application to masonry.*** Proceedings of IDETC/CIE 2005 ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Ref IDETC-84779, 5th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control, Long Beach, California, USA, September 24-28, 2005, VOL 6, PTS A-C , p. 2031-2035.

Chetouane *et al.*, 2005

Chetouane B., Dubois F., Vinches M., Bohatier C., ***NSCD discrete element method for modelling masonry structures,*** *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 64, issue 1, p. 65-94, 7 sept. 2005, (référence DOI: 10.1002/nme.1358)

Chetouane *et al.*, 2008

Chetouane B., Vinches M., Dubois F., Bohatier C., Devillers Ph., Nemoz-Gaillard M. ***Analyse comparée de différentes modélisations du comportement au séisme de monuments en pierre sèche.*** Archéosismicité et Vulnérabilité. Patrimoine bâti et Société, N° ISBN 978-2- 9515025-2-9, Actes des VI^o et VII^o rencontres du groupe APS, mars 2008, p. 113-126.

Leveau, 1995

Leveau Ph., **Les moulins de Barbegal, les ponts-aqueducs du vallon des arcs et l'histoire naturelle de la vallée des Baux (Bilan de six ans de fouilles programmées)** CRAI, janvier-mars 1995, p. 115-144.

Pérales, 2007

Pérales R., **Modélisation du comportement mécanique par éléments discrets des ouvrages maçonnés tridimensionnels. Contribution à la définition d'éléments de contacts surfaciques.** Thèse de doctorat, discipline : Mécanique, Génie Mécanique et Génie Civil, Université de Montpellier II, 241 pages.

Pérales *et al.*, 2007

Pérales R., Bohatier C., Vinches M., Nemoz-Gaillard M., **New developments on the distinct element modelling using the NSCD method.** ECCOMAS thematic conference COMPDYN 2007, 13-15 June 2007, Rethymno, Greece.

Pérales *et al.*, 2008

Pérales R., Vinches M., Bohatier C., **Etablissements recevant du public en pierre massive : apports des modélisations discontinues.** Archéosismicité et Vulnérabilité. Patrimoine bâti et Société, N° ISBN 978-2-9515025-2-9, Actes des VI° et VII° rencontres du groupe APS, mars 2008, pp 189-197.

Rafiee, 2008

Rafiee A., **Contribution à l'étude de la stabilité des massifs rocheux fracturés : caractérisation de la fracturation in situ, géostatistique et mécanique des milieux discrets,** thèse de doctorat, discipline Mécanique et Génie Civil, Université de Montpellier II, juin 2008, 271 pages

Rafiee *et al.*, 2008(a)

Rafiee A., Vinches M., Bohatier C., **Application of the NSCD method to analyse the dynamic behaviour of stone arched structures.** Int. Journal of Solids and Structures, volume 45, issues 25-26, p. 6269-6283, dec. 15 2008 (référence DOI : 10.1016/j.ijsolstr.2008.07.034).

Rafiee *et al.*, 2008(b)

Rafiee A., Vinches M., Bohatier C., **Modelling and analysis of the Nîmes arena and the Arles aqueduct subjected to a seismic loading, using the Non-Smooth Contact Dynamics method,** Journal of Engineering Structures, volume 30, number 12, p. 3457-3467, december 2008. (référence DOI : 10.1016/j.engstruct.2008.05.018

Vinches et Chetouane, 2004

Vinches M., Chetouane B., **Un modèle de solidité - Vie et mort de l'aqueduc de Nîmes.** Pour la Science, (version française de American Scientific) N° 02687, p. 56-57 - août 2004.

