

VIIIèmes RENCONTRES EUROPÉENNES DU GROUPE APS
& Journée technique AFPS

« *Archéosismicité et valorisation du bâti ancien européen
dans une culture de développement durable* »



ECOLE DES MINES D'ALÈS
Alès - Nîmes - Pau



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



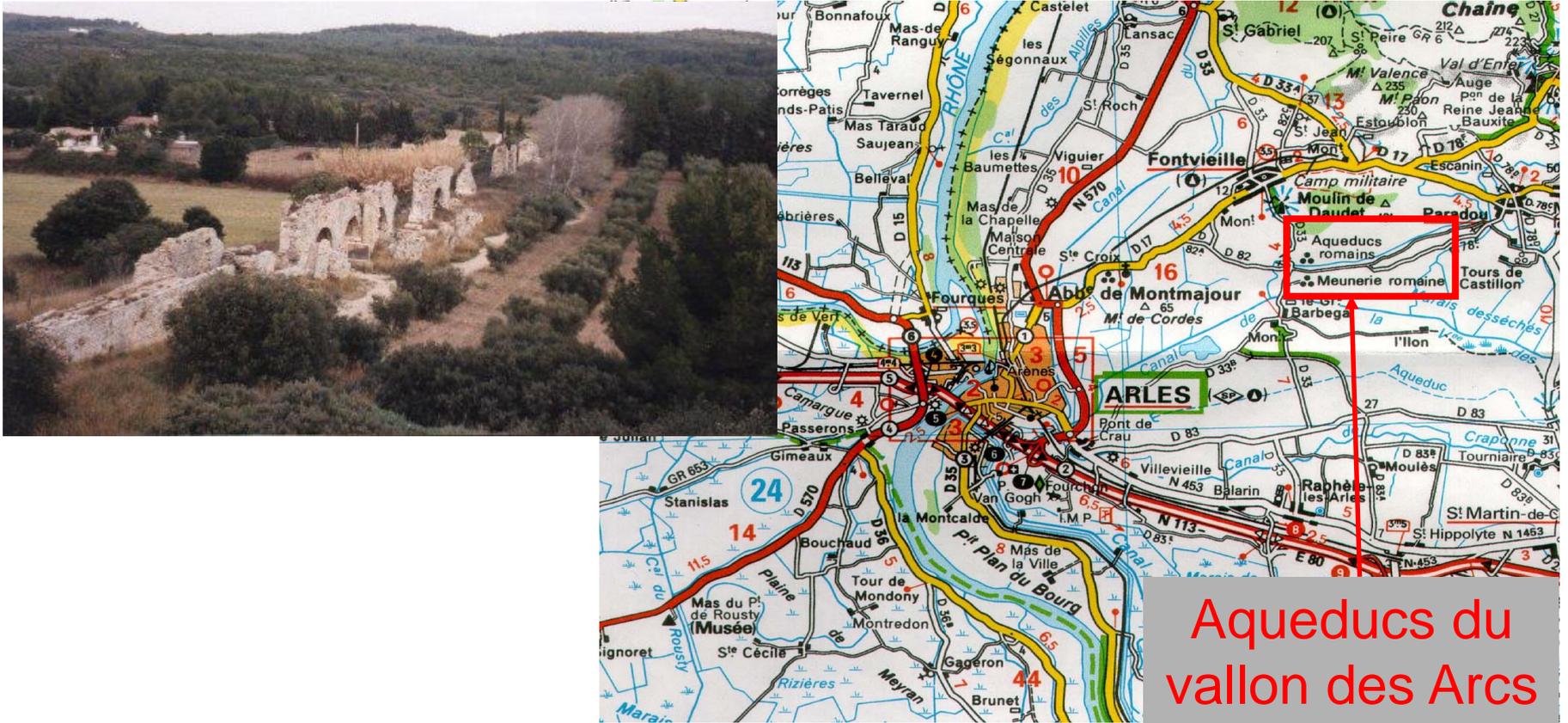
Manosque

15-16-17 décembre 2008

Marc Vinches
(Ecole des Mines d'Alès - CMGD)
Claude Bohatier
(Montpellier II-LMGCC)

Eléments de contexte

Modélisation de maçonneries en grand appareil



Thèse de Brahim Chétouane , soutenue le 8 novembre 2004

Approche combinée éléments finis / éléments distincts pour la modélisation des ouvrages archéologiques en grand appareil

Université de Montpellier II, Ecole Doctorale: Informations, Structures et Systèmes

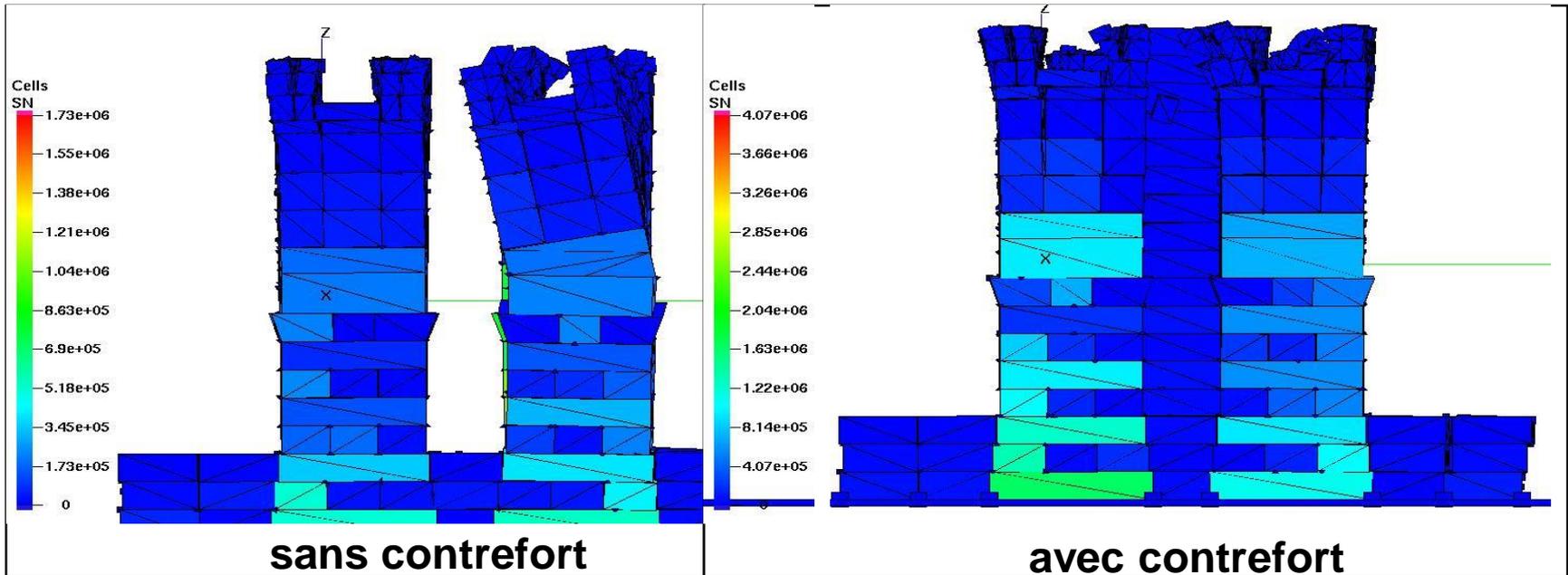
Éléments de contexte



Aqueduc d'Arles (Ouest)

Aqueduc des Moulins (Est)³

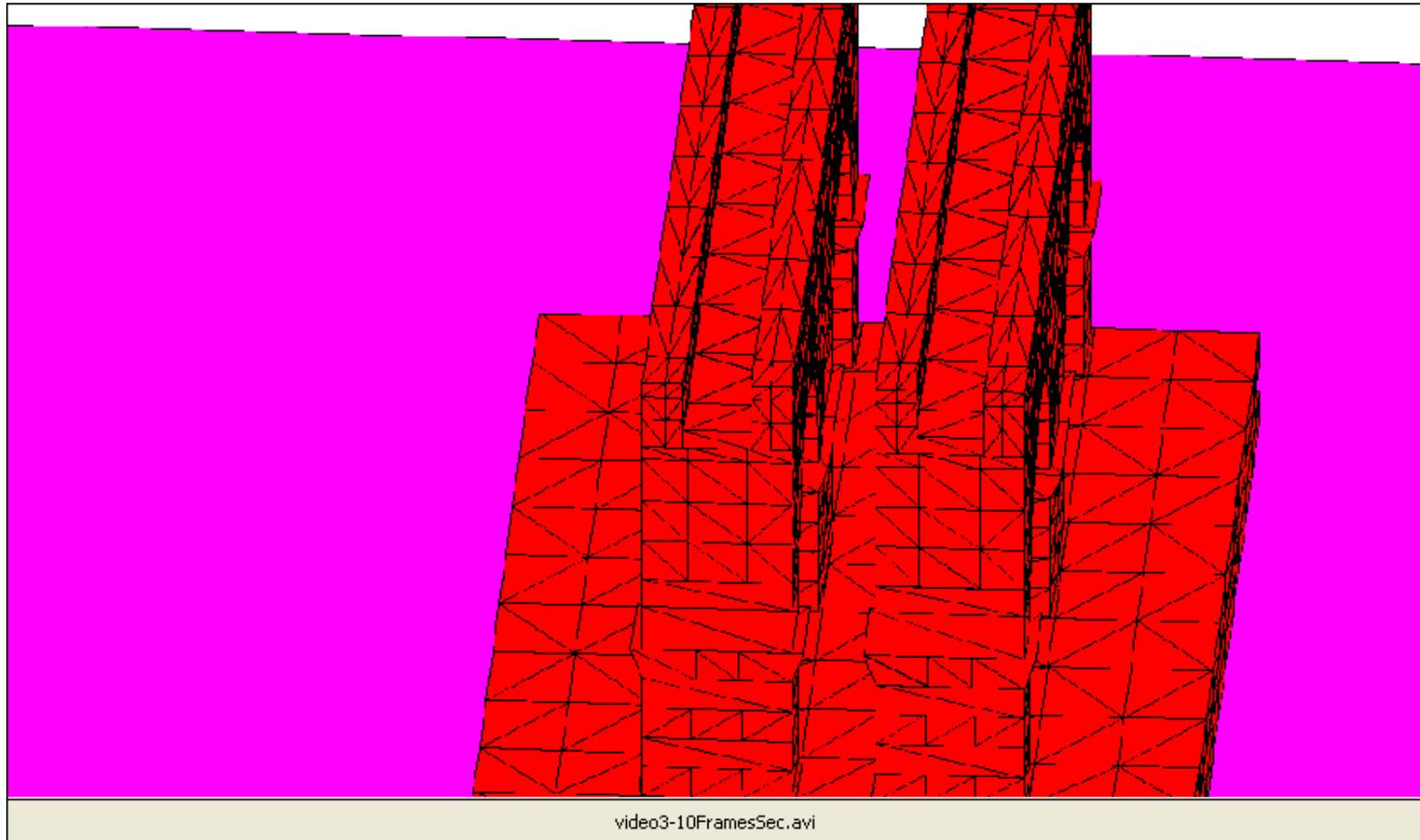
Éléments de contexte



Réponse des deux aqueducs à une accélération
horizontale sinusoïdale de 0.3g

Modèle d'aqueducs en grand appareil à partir d'une reconstitution archéologique
proposée par R. THERNOT, architecte.

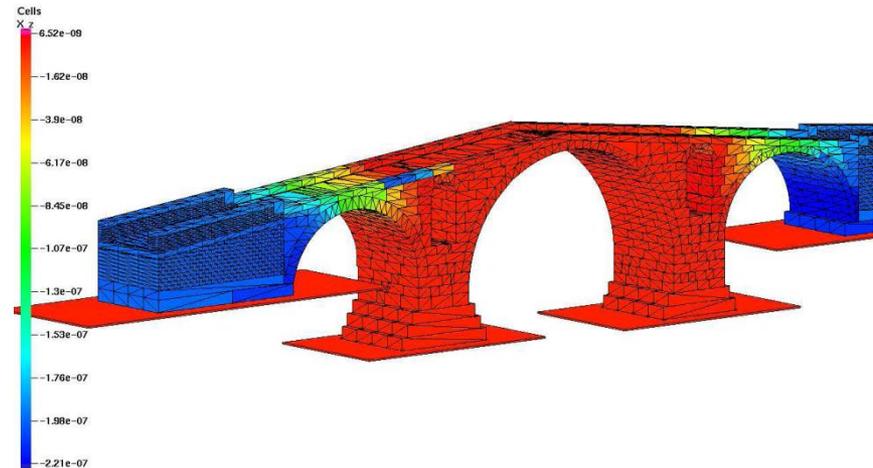
Eléments de contexte



B. Chetouane, F. Dubois, **M. Vinches**, C. Bohatier (2005): 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

Eléments de contexte

Modélisation de maçonneries en grand appareil : le Pont Julien



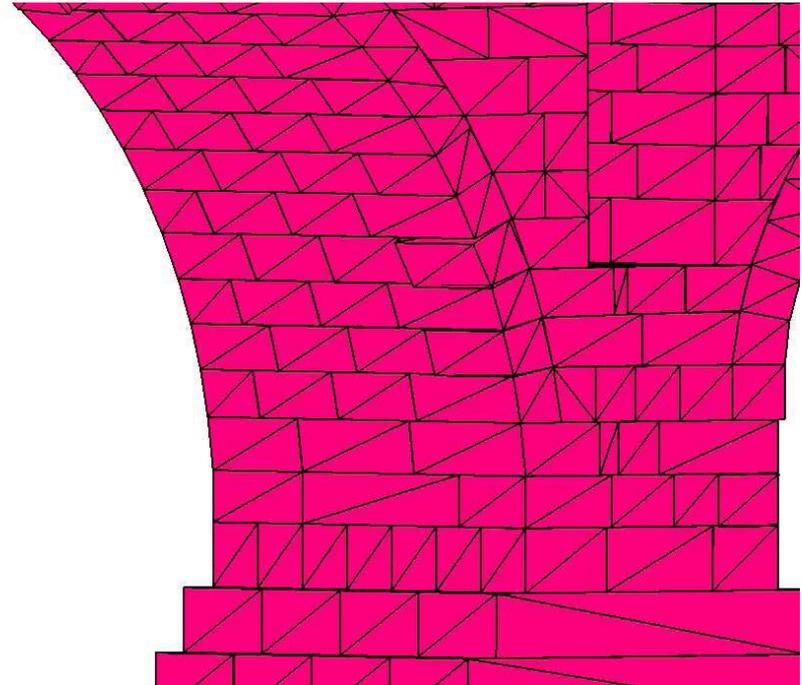
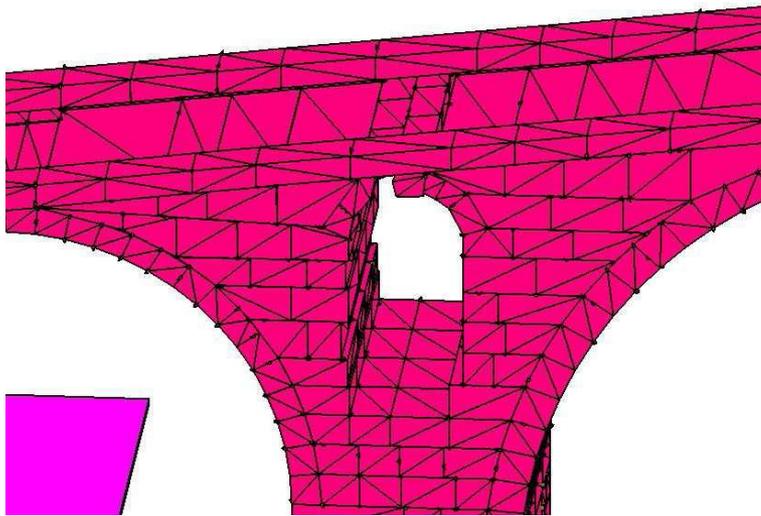
Thèse de Robert PERALES, soutenance 27 septembre 2007

Contribution à l'étude du comportement mécanique de structures discontinues de génie civil, modélisées dans le cadre de la méthode NSCD.

Université de Montpellier II, Ecole Doctorale: Informations, Structures et Systèmes

Eléments de contexte

Modélisation de maçonneries en grand appareil : le Pont Julien



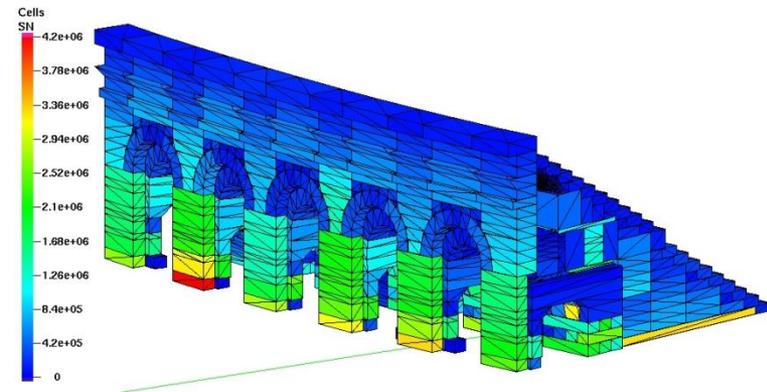
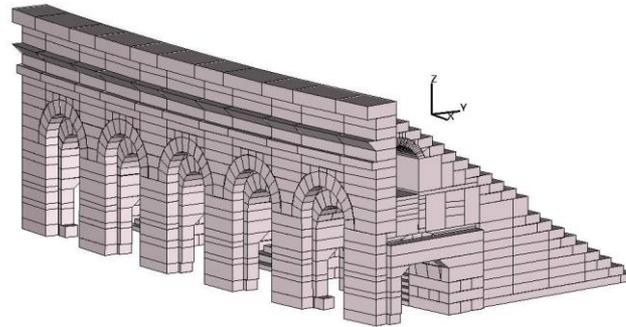
Thèse de Robert PERALES, soutenance 27 septembre 2007

Contribution à l'étude du comportement mécanique de structures discontinues de génie civil, modélisées dans le cadre de la méthode NSCD.

Université de Montpellier II, Ecole Doctorale: Informations, Structures et Systèmes

Eléments de contexte

Modélisation de maçonneries en grand appareil : arènes de Nîmes

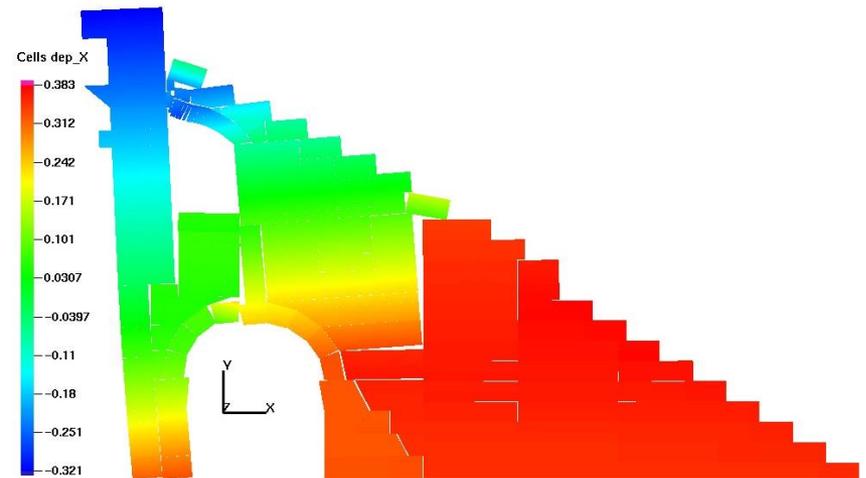
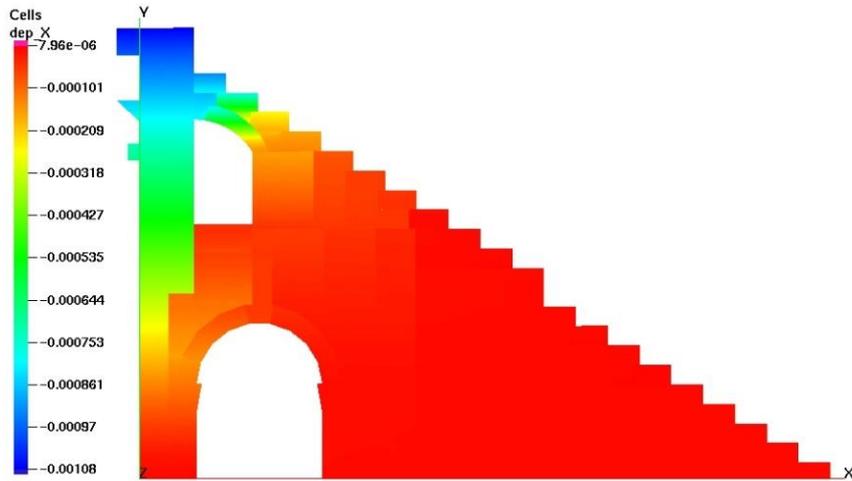


Thèse d'Ali RAFIEE, soutenance 20 juin 2008.

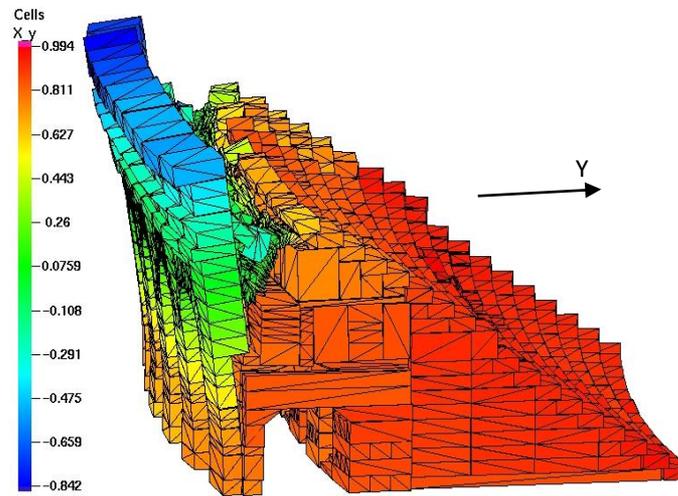
Contribution à l'étude de la stabilité des massifs rocheux fracturés : caractérisation de la fracturation in situ, géostatistique et mécanique des milieux discrets.

Université de Montpellier II, Ecole Doctorale: Informations, Structures et Systèmes

Eléments de contexte



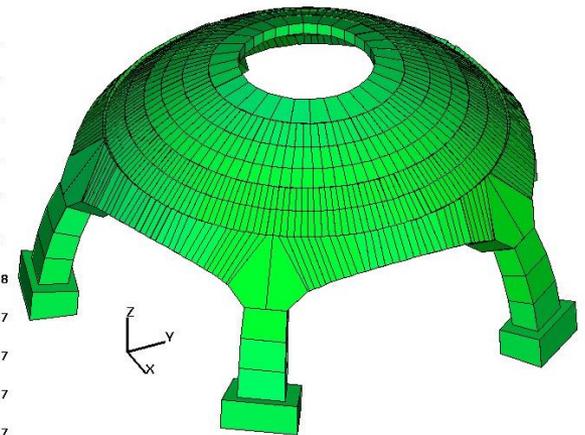
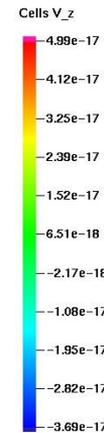
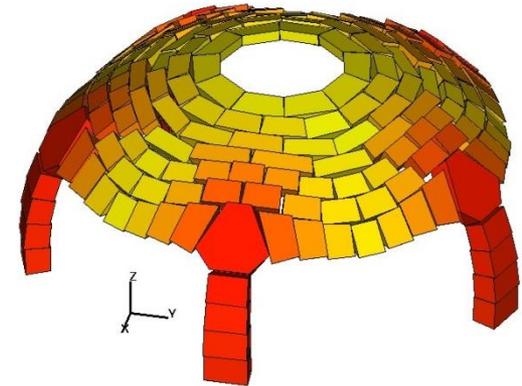
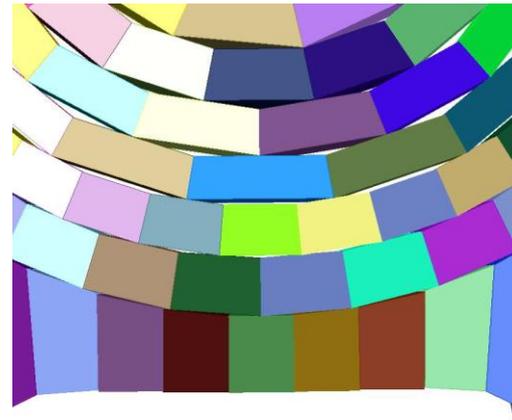
Eléments de contexte



A. Rafiee, **M. Vinches**, C. Bohatier: 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*, disponible en ligne le 30 juin 2008. (référence DOI : [10.1016/j.engstruct.2008.05.018](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.05.018))

Eléments de contexte

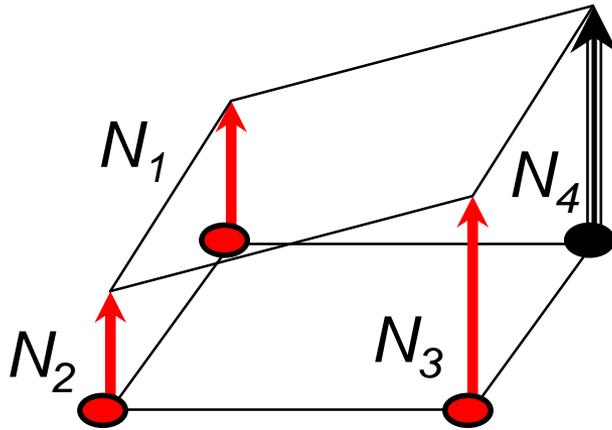
Modélisation de maçonneries en grand appareil : coupole de Junas



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

Hypothèses de répartition des actions normales et tangentielles

Actions normales :

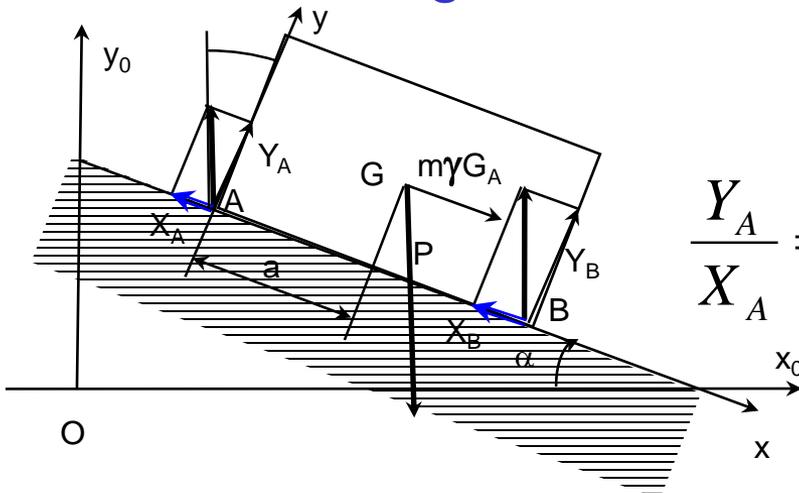


→ Action normale principale

⇒ Action normale non principale

- Hypothèse compatible avec le mouvement de solide rigide dans l'espace orthogonal à celui de champ de vitesses réel

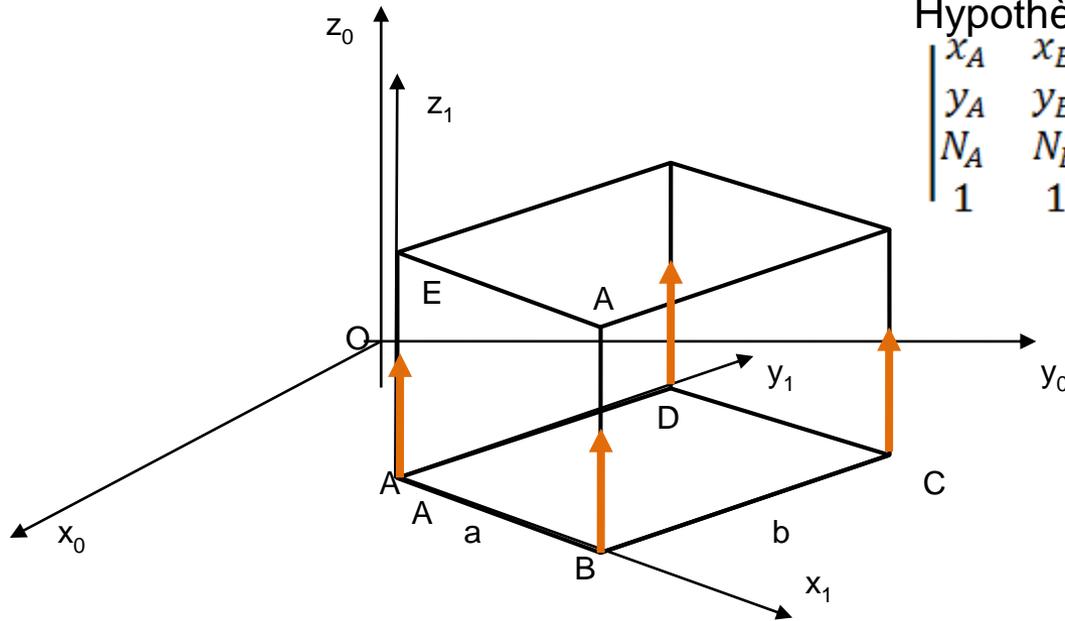
Actions tangentielles :



$$\frac{Y_A}{X_A} = \frac{Y_B}{X_B}$$

- Hypothèse compatible avec équiprojectivité du champ de vitesses de glissement et les 2 lois de Coulomb

Levée de l'indétermination pour une liaison plane parfaite réalisée par 4 liaisons ponctuelles:



Hypothèse de répartition linéaire spatiale

$$\begin{vmatrix} x_A & x_B & x_C & x_D \\ y_A & y_B & y_C & y_D \\ N_A & N_B & N_C & N_D \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & a & a & 0 \\ 0 & 0 & b & b \\ N_A & N_B & N_C & N_D \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$\vec{\Omega}_{01}^* = p_{01}^* \vec{x}_1 + q_{01}^* \vec{y}_1$$

$$\{V_{01}\} = \begin{Bmatrix} \vec{\Omega}_{01} \\ V_{01A} \end{Bmatrix} \quad \{V_{01}^*\} = \begin{Bmatrix} \vec{\Omega}_{01}^* \\ V_{01}^* \end{Bmatrix}$$

$$\vec{V}_{01} A \cdot \vec{z}_1 = 0, \vec{\Omega}_{01} = \Omega_{01} \vec{z}_1$$

$$\{V_{01}\} \cdot \{V_{01}^*\} = 0$$

équation supplémentaire

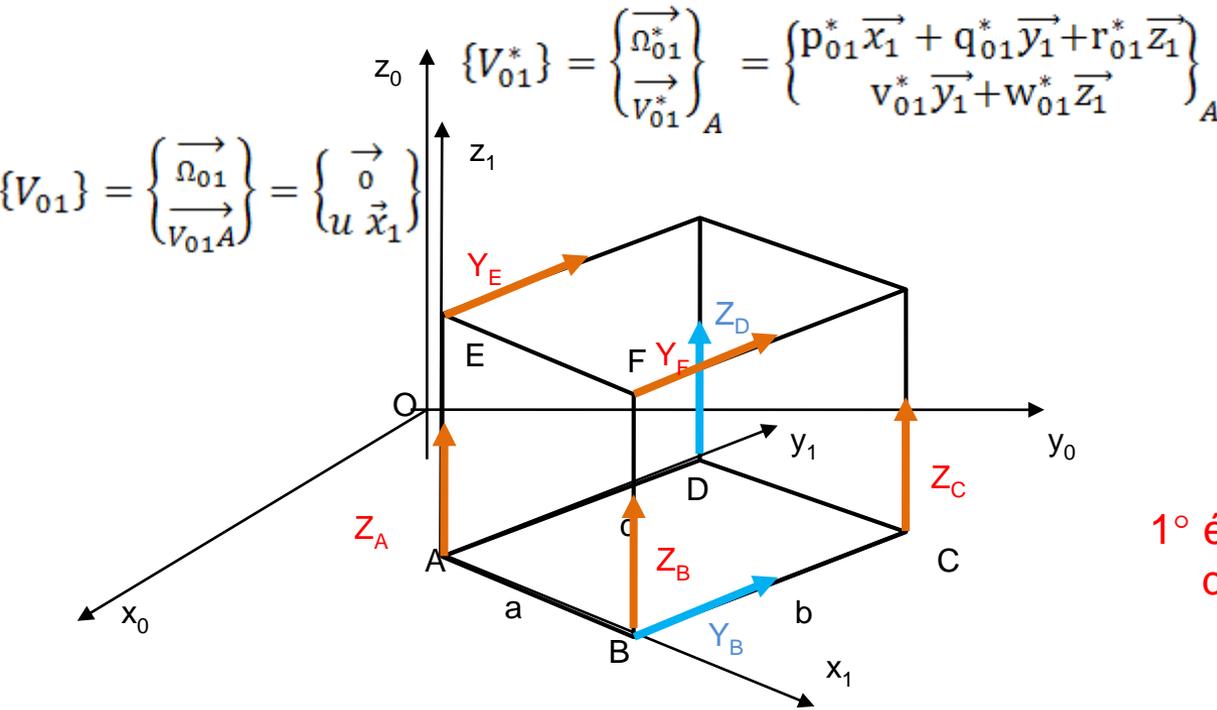
$$\begin{aligned} \vec{V}_{01}^* A \cdot \vec{z}_1 &= \lambda N_A \\ \vec{V}_{01}^* B \cdot \vec{z}_1 &= \lambda N_B \\ \vec{V}_{01}^* C \cdot \vec{z}_1 &= \lambda N_C \\ \vec{V}_{01}^* D \cdot \vec{z}_1 &= \lambda N_D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\vec{V}_{01}^* B + \vec{\Omega}_{01}^* \times \vec{BC}) \cdot \vec{z}_1 &= \lambda N_C \\ (\vec{V}_{01}^* A + \vec{\Omega}_{01}^* \times \vec{AD}) \cdot \vec{z}_1 &= \lambda N_D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda N_B + b p_{01}^* &= \lambda N_C \\ \lambda N_A + b p_{01}^* &= \lambda N_D \end{aligned}$$

$$N_A - N_B + N_C - N_D = 0$$

Cas d'une liaison glissière obtenues par mise en parrallèle de liaisons ponctuelles



Equations de la statique après réduction en A

$$0 = 0$$

$$Y_B + Y_E + Y_F = Y$$

$$Z_A + Z_B + Z_C + Z_D = Z$$

$$bZ_C + bZ_D - cY_E - cY_F = L$$

$$aZ_B + aZ_C = M$$

$$aY_B + aY_F = N$$

1° équation supplémentaire même démarche que liaison plane

$$Z_A - Z_B + Z_C - Z_D = 0$$

2° équation supplémentaire

$$Y_E + Y_B = Y_F$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{01A} \cdot \vec{y}_1 &= 0 \\ \vec{V}_{01B} \cdot \vec{y}_1 &= \lambda Y_B \\ \vec{V}_{01F} \cdot \vec{y}_1 &= \lambda Y_F \\ \vec{V}_{01E} \cdot \vec{y}_1 &= \lambda Y_E \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\vec{V}_{01A} + \vec{\Omega}_{01} \times \vec{AB}) \cdot \vec{y}_1 &= \lambda Y_B \\ (\vec{V}_{01A} + \vec{\Omega}_{01} \times \vec{AF}) \cdot \vec{y}_1 &= \lambda Y_F \\ (\vec{V}_{01A} + \vec{\Omega}_{01} \times \vec{AE}) \cdot \vec{y}_1 &= \lambda Y_E \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ar_{01}^* &= \lambda Y_B \\ -cp_{01}^* + ar_{01}^* &= \lambda Y_F \\ -cp_{01}^* &= \lambda Y_E \end{aligned}$$

Justification de l'hypothèse de répartition des actions tangentielles

Hypothèse

$$\frac{\vec{T}_A \cdot \overline{AB}}{N_A} = \frac{\vec{T}_B \cdot \overline{AB}}{N_B}$$

Cas du glissement: équiprojectivité des vitesses nodales \vec{V}_A and \vec{V}_B

$$\vec{V}_A \cdot \overline{AB} = \vec{V}_B \cdot \overline{AB}$$

1° loi de Coulomb

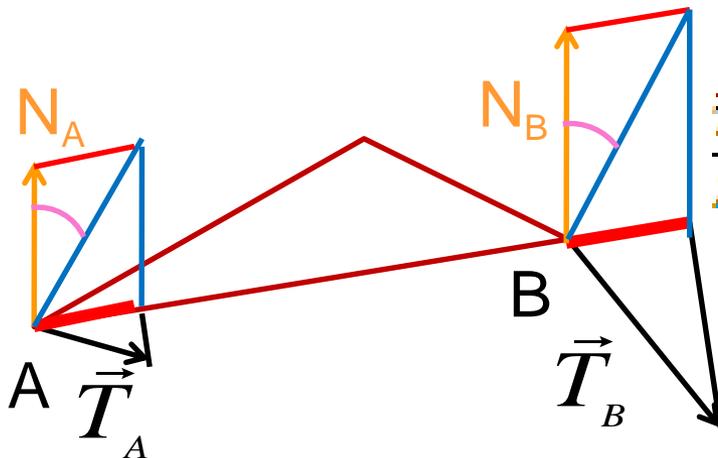
$$\|\vec{T}_A\| \leq f N_A$$

Dans le cas du glissement

$$\|\vec{T}_A\| = f N_A \quad \|\vec{T}_B\| = f N_B$$

2° loi de Coulomb

$$\vec{T}_A = -\lambda_A \vec{V}_A \quad \text{et} \quad \vec{T}_B = -\lambda_B \vec{V}_B$$



$$\frac{\vec{T}_A}{\lambda_A} \cdot \overline{AB} = \frac{\vec{T}_B}{\lambda_B} \cdot \overline{AB}$$

si $\frac{\lambda_B}{\lambda_A} = \frac{N_B}{N_A}$

Extension au cas de non glissement

Equations supplémentaires pour les inconnues tangentielles

Dans le cas d'une liaison plane

$$\frac{X_A}{Z_A} = \frac{X_B}{Z_B} \quad X_A Z_B - X_B Z_A = 0 \quad X_A^n Z_B^{n-1} - X_B^n Z_A^{n-1} = 0$$

$$\begin{aligned} X_A^n Z_B^{n-1} - X_B^n Z_A^{n-1} &= 0 \\ Y_B^n Z_C^{n-1} - Y_C^n Z_B^{n-1} &= 0 \\ (aX_A^n + bY_A^n)Z_C^{n-1} - (aX_C^n + bY_C^n)Z_A^{n-1} &= 0 \end{aligned}$$

} Équations supplémentaires pour une liaison plane définie par 3 noeuds

$$\begin{aligned} X_C^n Z_D^{n-1} - X_D^n Z_C^{n-1} &= 0 \\ Y_A^n Z_D^{n-1} - Y_D^n Z_A^{n-1} &= 0 \end{aligned}$$

} Équations supplémentaires pour chaque noeud supplémentaire aux 3 noeuds

Dans le cas d'une liaison glissière

$$\begin{aligned} X_A^n N_B^{n-1} - X_B^n N_A^{n-1} &= 0 \\ N_B^{n-1} &= \sqrt{(Y_B^{n-1})^2 + (Z_B^{n-1})^2} \end{aligned}$$

CONCLUSIONS

- Constatations concernant la modélisation et la résolution des problèmes à partir du logiciel LMGC90 concernant le bâti ancien amènent à une réflexion pour proposer une voie spécifique
- Modélisation des actions de contact à partir d'un nombre d'inconnues minimal permettant la résolution du système d'équations données par la dynamique
- Résolution plus rapide du système d'équation
- Résultats plus réalistes