



**HAL**  
open science

## Modélisation de la maquette SMART sous séisme : utilisation d'un modèle d'endommagement anisotrope tridimensionnel

Grégory Lebon, Frédérique Ragueneau, Rodrigue Desmorat

► **To cite this version:**

Grégory Lebon, Frédérique Ragueneau, Rodrigue Desmorat. Modélisation de la maquette SMART sous séisme : utilisation d'un modèle d'endommagement anisotrope tridimensionnel. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01408407

**HAL Id: hal-01408407**

**<https://hal.science/hal-01408407>**

Submitted on 4 Dec 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Modélisation de la maquette SMART sous séisme : utilisation d'un modèle d'endommagement anisotrope 3D

G. Lebon<sup>1</sup>, F. Ragueneau<sup>1</sup>, R. Desmorat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMT-Cachan, ENS-Cachan/CNRS/UPMC/PRES UniverSud Paris  
61, av. du président Wilson, F-94235 CACHAN Cedex, FRANCE  
{lebon,ragueneau,desmorat}@lmt.ens-cachan.fr

---

**Résumé** — Le comportement complexe du béton est modélisé par un modèle d'endommagement continu avec anisotropie induite et effet unilatéral. Ces aspects du comportement étant modélisés, il est ainsi possible d'appréhender le comportement des structures en béton armé sous chargements complexes (séismes multiaxiaux). Le modèle est finalement testé sur le projet SMART, initié par le CEA, qui propose l'analyse d'une structure complexe sous séisme bidirectionnel.

**Mots clés** — Béton armé, endommagement anisotrope, effet unilatéral, SMART.

---

## Introduction

L'étude des structures complexes de génie civil est primordiale pour assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages nucléaires. Le CEA de Saclay propose donc l'étude d'une structure complexe : maquette représentant un ouvrage de 3 étages fortement non symétrique. La forte dyssymétrie, se traduisant par un centre de gravité et un centre de torsion distincts, provoque une réponse complexe et oblige à utiliser des modèles fins.

D'une hauteur totale de 3.6m et d'une masse de 42 tonnes (avec masses ajoutées) la maquette sera testée sur la table vibrante du CEA pour valider les modèles. La phase expérimentale se compose de plusieurs tests avec une intensité croissante de 0.1g à 1g. Pour chaque test, une centaine de capteurs mesurent les accélérations et les déplacements de la maquette. Toutes ces données seront comparées aux résultats des analyses dans la dernière phase du benchmark.

## 1 Modèle d'endommagement anisotrope 3D

### 1.1 Potentiel thermodynamique

Le béton possède un comportement fortement non linéaire et complexe. Ce matériau quasi-fragile présente une dissymétrie importante entre la traction et la compression. De plus, lors de chargements cycliques et multiaxiaux, une anisotropie induite par l'endommagement et une récupération de raideur (Figures 1,2 et 3) compliquent considérablement la modélisation. Ces différents aspects sont primordiaux sous chargement cyclique tel un séisme.

Pour répondre à ces contraintes, un modèle d'endommagement continu [1][2][3][4][5] écrit dans le cadre de la thermodynamique des milieux continus à variables internes adapté à l'endommagement anisotrope [4] est proposé. Pour faciliter la modélisation, le potentiel [6] de Gibb

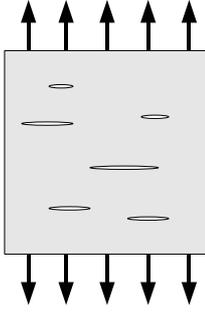


Figure 1 – Traction monotone

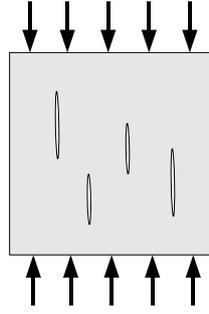


Figure 2 – Compression monotone

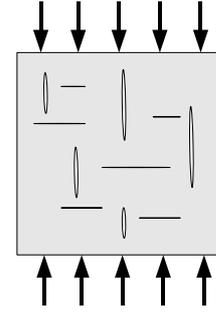


Figure 3 – Compression monotone

(EQ. 1) est divisé en différentes parties (hydrostatique positive et négative et déviatorique positive et négative) :

$$\rho\psi^* = \frac{1+\nu}{2E}\text{Tr}(\mathbf{H}\boldsymbol{\sigma}^D\mathbf{H}\boldsymbol{\sigma}^D) + \frac{1-2\nu}{6E} \left[ \frac{\langle\text{Tr}(\boldsymbol{\sigma})\rangle_+^2}{1-\frac{1}{3}\text{Tr}(\mathbf{D})} + \langle\text{Tr}(\boldsymbol{\sigma})\rangle_-^2 \right] \quad (1)$$

où  $\rho$  est la masse volumique,  $\psi^*$  l'énergie libre,  $\nu$  le coefficient de Poisson,  $E$  le module d'Young,  $\mathbf{H} = (\text{Id} - \mathbf{D})^{1/2}$  avec  $\mathbf{D}$  le tenseur d'endommagement symétrique,  $\boldsymbol{\sigma}$  le tenseur des contraintes.

Ainsi, il apparait clairement que quelque soit l'état d'endommagement du matériau, un chargement en tri-compression n'est pas affecté, ce qui engendrera une refermeture partielle des fissures et donc l'effet unilatéral désiré.

Les déformations (EQ. 2) sont obtenues en dérivant simplement le potentiel ci-dessus (EQ. 1) :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1+\nu}{E} [\mathbf{H}\boldsymbol{\sigma}^D\mathbf{H}]^D + \frac{1-2\nu}{3E} \left[ \frac{\langle\text{Tr}(\boldsymbol{\sigma})\rangle_+}{1-\frac{1}{3}\text{Tr}(\mathbf{D})} + \langle\text{Tr}(\boldsymbol{\sigma})\rangle_- \right] \quad (2)$$

## 1.2 Fonction critère et loi d'évolution

Le béton étant extrêmement fragile en traction, la fonction critère (EQ. 3) choisie est donc en déformations équivalentes :

$$f = \hat{\varepsilon} - \kappa \quad (3)$$

avec  $\hat{\varepsilon}$  les déformation équivalente de Mazars (EQ. 4) qui ne prend en compte que les déformations positives.

$$\hat{\varepsilon} = \sqrt{\langle\boldsymbol{\varepsilon}\rangle_+ : \langle\boldsymbol{\varepsilon}\rangle_+} \quad (4)$$

où  $\langle\boldsymbol{\varepsilon}\rangle_+$  désigne la partie positive du tenseur des déformations  $\boldsymbol{\varepsilon}$ . La fonction de consolidation (EQ. 5), dépendant de l'état d'endommagement effectif  $d_\varepsilon$  est définie par l'équation ci-dessous :

$$\kappa(d_\varepsilon) = a \cdot \tan \left[ \frac{d_\varepsilon}{aA} + \arctan \left( \frac{\kappa_0}{a} \right) \right] \quad (5)$$

où  $\kappa_0$  est le seuil initial,  $a$  et  $A$  des paramètres intrinsèques.

L'évolution de l'endommagement (EQ. 6) doit être aussi gouvernée par les déformations positives [8] :

$$\dot{D} = \dot{\lambda} \langle\boldsymbol{\varepsilon}\rangle_+ \quad (6)$$

Cette évolution permet de représenter l'anisotropie induite par l'endommagement : les microfissures apparaissent perpendiculairement aux déformations positives.

### 1.3 Endommagement effectif

Pour gouverner l'évolution de la surface seuil, il faut définir une variable traduisant l'état d'endommagement effectif du matériaux. En effet, si on suppose un matériau pré-chargé en traction sollicité en compression, la limite d'élasticité dans cette direction de chargement doit être identique à la surface initiale. Ainsi, on définit l'endommagement effectif  $d_e$  (EQ. 7) [9] comme la projection du tenseur d'endommagement sur le tenseur des déformations positives, normalisé par la déformation principale :

$$d_e = \frac{D : \langle \boldsymbol{\epsilon} \rangle_+}{\max(\boldsymbol{\epsilon}_I)} \quad (7)$$

### 1.4 Comportement uniaxial et Surface seuil

Pour illustrer l'apport de la récupération de raideur et de l'endommagement effectif dans un chargement cyclique, la réponse d'un point de Gauss soumis à une traction compression est analysée.

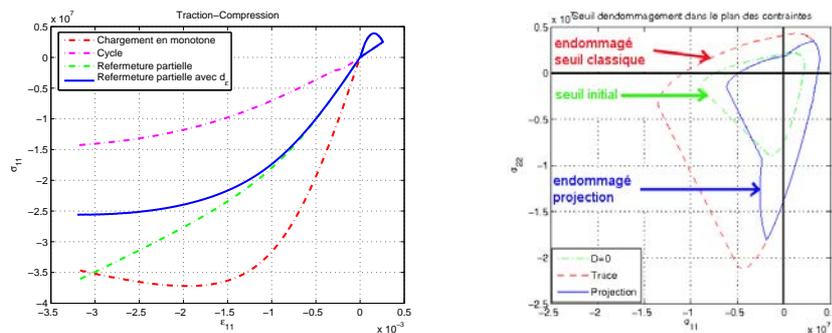


Figure 4 – Comportement cyclique

Ainsi, la refermeture partielle des fissures (sur la partie hydrostatique) est nécessaire et suffisante pour un chargement cyclique type séisme. Toutefois, sans la notion d'endommagement effectif, la contrainte maximale en compression est bien supérieure à la résistance initiale, d'où la nécessité d'endommagement effectif dans la fonction de consolidation. En effet, l'endommagement effectif permet d'écrouir le domaine élastique uniquement dans la direction de chargement et non de façon isotrope. La surface seuil devient non convexe, ce qui ne pose pas de problème dans un modèle non associé comme celui exposé ici.

## 2 Modélisation et résultats

### 2.1 Modélisation

La conception de la maquette SMART prévoit une rupture dans les voiles. Ainsi, pour optimiser la simulation, la maquette est divisée en plusieurs parties affectées de modèles différents. Seuls les voiles et le poteau sont modélisés par le modèle anisotrope 3D décrit ci-dessus. Les éléments utilisés sont les éléments cubiques à huit point de Gauss. Dans ces parties, le ferrailage est modélisé par des éléments barre elastoplastique. Le reste de la structure est représentée par des modèles élastiques 3D (poutres, fondation) ou 2D (planchers).

Les paramètres matériaux sont résumés dans les tableaux (TAB. 1)(TAB. 2).

Module d'Young	E	32 GPa
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.2
Seuil initial	$\kappa_0$	$5.0E - 05$
	A	$5.E + 3$
	a	$2.93E - 4$

Tableau 1 – Paramètres matériau pour le béton

Module d'Young	E	200 GPa
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.3
Limite d'élasticité	$\sigma_y$	$600.E + 06$

Tableau 2 – Paramètres matériau pour l'acier

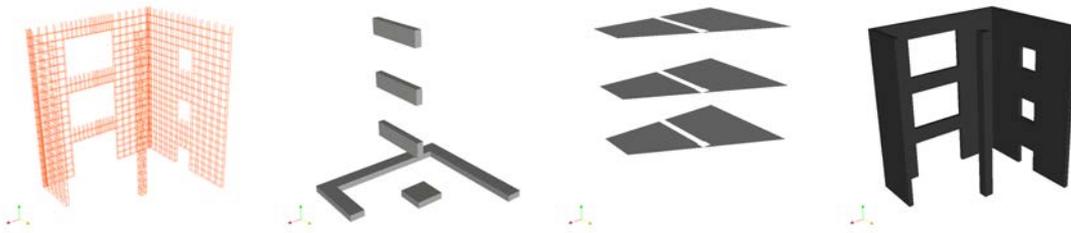


Figure 5 – Modèles

## 2.2 Résultats

### 2.2.1 Analyse modale

Dans un premier temps, une analyse modale est effectuée (TAB. 3) afin de confirmer la complexité des premiers modes. Ainsi on s'aperçoit que les deux premiers modes (FIG. 6) sont dominés par des modes de flexions, alors que le quatrième est un mode de torsion. Ce dernier fait partie des modes prédominants, résultant de la géométrie de la maquette.

Mode	Fréquence en Hz	Période en s
1	9.4459	0.10587
2	16.547	0.06043
3	31.015	0.03224
4	32.685	0.03060

Tableau 3 – Premiers modes propres

### 2.2.2 Analyse temporelle

La modélisation étant validée par l'analyse modale, la suite de l'étude se compose de plusieurs analyses temporelles. La maquette subit plusieurs séismes bidirectionnels (dans le plan horizontal) d'amplitude variable. Nous allons nous concentrer sur trois niveaux d'intensité : 0.1, 0.4 et 0.8g. Pour chaque analyse le déplacement relatif ainsi que le spectre en accélération absolue du point F (plancher supérieur) sont calculés. Enfin, la carte d'endommagement en fin de signal est indiquée.

La réponse en déplacement (FIG. 7) montre une chute de la fréquence et une augmentation de l'amplitude de la réponse alors que l'intensité de l'excitation augmente. De plus, le spectre

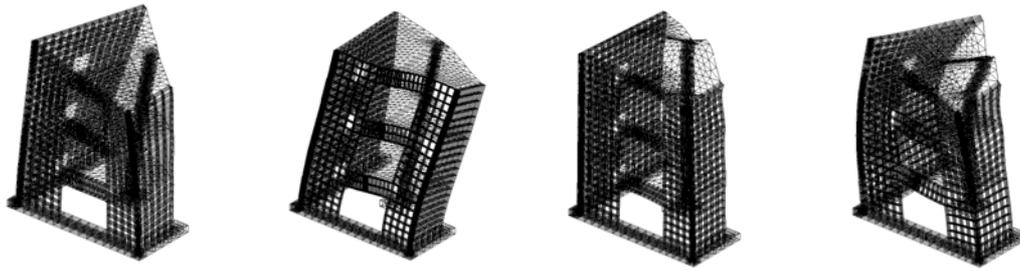


Figure 6 – Premiers modes (9.4459Hz, 16.547Hz, 31.015Hz et 32.685Hz)

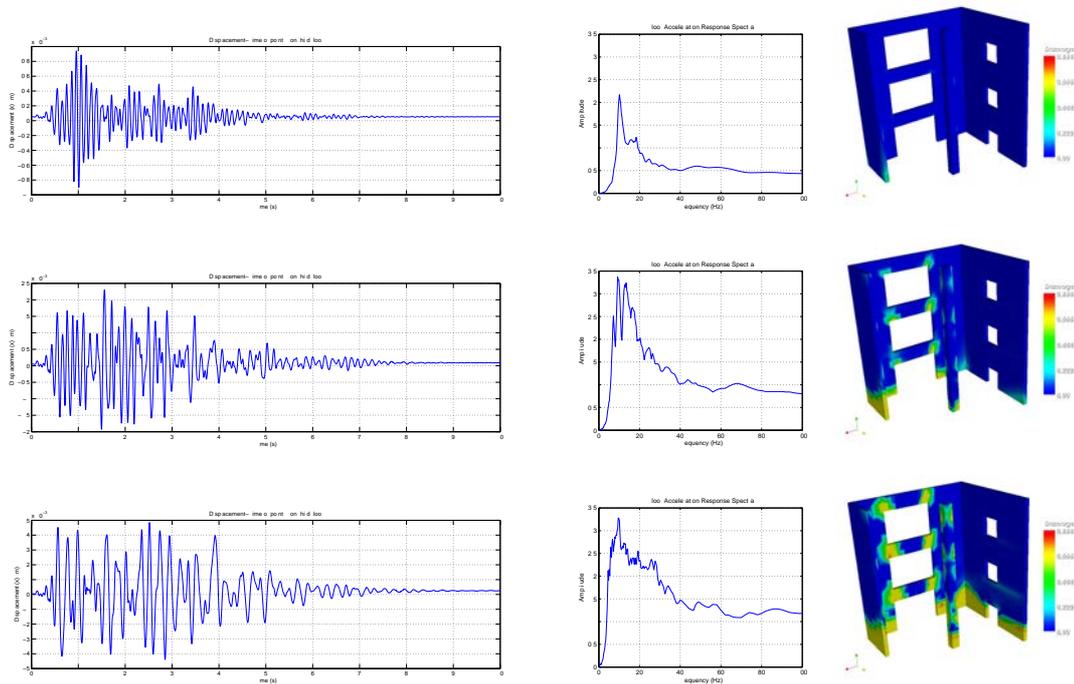


Figure 7 – Analyse temporelle

en accélération s'étale lors des fortes intensités, et met en évidence l'assouplissement de la maquette dû à l'endommagement de celle-ci. Les cartes d'endommagement permettent de localiser les zones endommagées. Ces dernières sont situées essentiellement en pied de murs (jonction avec les fondations) et sur les linteaux des grandes ouvertures.

## Conclusion

Le modèle d'endommagement anisotrope proposé ici montre ses capacités dans la simulation de structures complexes (12439 éléments dont 4704 éléments *CUB8* et 4214 éléments *barre* non linéaire, soit un total de 26265 degrés de liberté). Les principales caractéristiques du comportement complexe du béton (endommagement et anisotropie) ont été introduites à l'échelle locale par la thermodynamique des processus irréversibles. Une écriture robuste des lois d'évolution et une implantation numérique adéquate rendent possible l'utilisation de tels modèles 3D dans le calcul de structures de grandes tailles sous chargements complexes.

## Références

- [1] A. Dragon, T. Cormery, T. Désoyer, D. Halm. Localised failure analysis using damage models. extrait de *Localisation and bifurcation theory for soils and rocks*, 127–140, 1994.
- [2] P. Badel, V. Godard, J.-B. Leblond. Application of some anisotropic damage model to the prediction of the failure of some complex industrial concrete structure. *International Journal of Solids and Structures*.
- [3] J. Cordebois, F. Sidoroff. Damage induced elastic anisotropy. *Colloque Euromech*, 1979.
- [4] P. Ladevèze. Sur une théorie de l'endommagement anisotrope. *Rapport interne LMT*, 1–34, 1983.
- [5] S. Murakami. Mechanical modeling of material damage. *Journal of Applied Mechanics*, 280–286, 1988.
- [6] J. Lemaitre, R. Desmorat. *Engineering Damage Mechanics : Ductile, creep, fatigue and brittle failures*, Springer, 2005.
- [7] R. Ragueneau, A. Soud, A. Delaplace, R. Desmorat. Hybrid simulations of nonlinear reinforced concrete frames. extrait de *Hybrid Simulation ; Theory, Implementation and Application*, 2008.
- [8] S. Ramtani, J. Mazars, Y. Berthaud. The unilateral behavior of damage concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 629–635, 1990.
- [9] R. Desmorat, F. Gatuing, R. Ragueneau. Nonlocal anisotropic damage model and related computational aspects for quasi-brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*.