

Modélisation simplifiée 3D du comportement dynamique de structures en béton armé

Jacky Mazars¹, Antonella Colombo¹ et Panagiotis Kotronis¹

¹ L3S - Structure Fédérative RNVO, UJF/INPG/CNRS Domaine Universitaire BP53
38041 Grenoble Cedex 9

RESUME. Des éléments poutres multifibres sont utilisés pour la simulation du comportement 3D d'une structure en béton armé soumise à un chargement dynamique. La maquette CAMUS 2000-1 est représentative d'un bâtiment à 5 étages et elle est testée à la table sismique Azalée de CEA à Saclay. Le programme expérimental a comme objectif l'évaluation du comportement de voiles faiblement armés soumis à des chargements bi-directionnels. La comparaison des résultats numériques avec l'expérience montre la pertinence de l'approche.

MOTS-CLÉS : poutre multifibre, table sismique, voile.

ABSTRACT. Multifiber beam elements are used for the simulation of the 3D behavior of a reinforced concrete structure under dynamic loading. CAMUS 2000-1 specimen is a 5 story structure and is tested on the seismic table Azalée in CEA Saclay. The objectives of the experimental program is to evaluate the behavior of lightly reinforced structures under bi-directional loading. Comparison of the numerical and the experimental results shows the performance of the approach.

KEYWORDS : multifiber beam, seismic table, shear wall.

1. INTRODUCTION

La simulation du fonctionnement des structures sous chargements sévères conduit généralement à des problèmes de grande taille, dont la résolution est délicate. L'approche complète - approche locale - consiste à conjuguer une modélisation géométrique (maillages 2D ou 3D), un modèle rhéologique (formulation de la loi de comportement en 2D ou en 3D) et un modèle de chargement. Elle permet d'aborder des problèmes complexes tels que le cisaillement non linéaire et la réponse d'un ouvrage jusqu'à la ruine. Cette approche est pourtant très délicate à mettre en œuvre, demande beaucoup d'expérience de la part de l'ingénieur et ne permet pas d'envisager son utilisation systématique dans le cadre de dimensionnement d'un ouvrage. L'approche simplifiée - semi-globale - constitue une approche intermédiaire où le champ de déplacements est décrit par les déplacements et les rotations d'un élément poutre, d'un élément plaque ou d'une coque, tandis que toute information concernant le comportement des matériaux est traitée au niveau local. Il s'agit dans la plupart de cas d'utiliser des éléments poutres avec les hypothèses cinématiques habituelles (Bernoulli ou Timoshenko). L'intégration du modèle rhéologique peut être réalisée en général par une intégration numérique classique sur la hauteur, si le problème est plan ou dans les deux directions de la section si le problème est tridimensionnel. Ce dernier type d'élément - dites souvent 'multifibre' - est efficace pour une analyse non-linéaire complexe d'éléments de structures composites tels ceux que l'on peut rencontrer

par exemple en béton armé (figure 1), (Guedes *et al.* 1994, Spacone *et al.* 1996, Petrangeli *et al.* 1999, Kotronis *et al.* 2004, Kotronis *et al.* 2005).

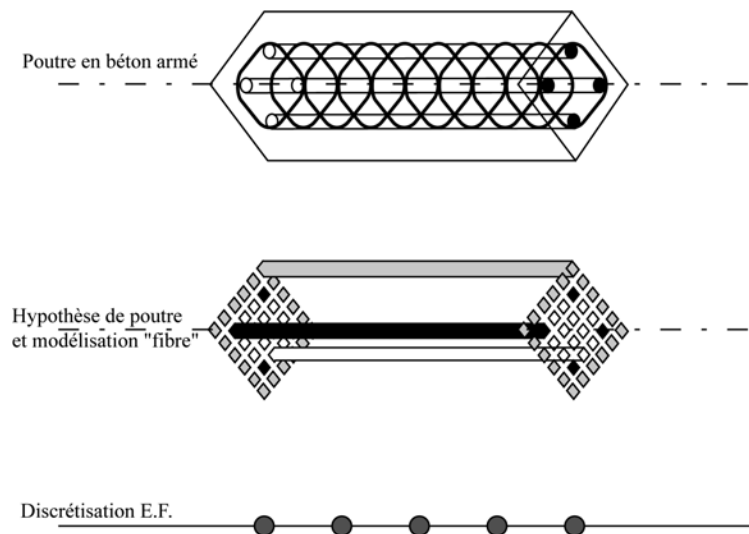


Figure 1 : Principe d'une poutre multifibre.

Le programme expérimental CAMUS 2000 a commencé en 1998 avec comme objectif l'évaluation des phénomènes de torsion et du comportement des voiles faiblement armés soumis à des chargements bi-directionnels. Deux maquettes d'échelle 1/3 représentatives de bâtiments en béton armé à 5 étages ont été testées à la table sismique Azalée de Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) à Saclay. La première maquette (CAMUS 2000-1) a été soumise à un chargement horizontal bi-directionnel. Des accélérogrammes d'amplitude croissante ont été appliqués (0.15g, 0.22g, 0.25g, 0.40g, 0.55g et 0.65g). La rigidité de la structure était fournie avec deux voiles identiques dans une direction et un système métallique de contreventement dans la direction perpendiculaire.

Dans le cadre du programme européen SAFERR des analyses numériques approfondies de la structure CAMUS 2000-1 ont été effectuées. L'objectif de travail présenté ci-dessous, était de simuler et appréhender - en utilisant des modèles simplifiés - le comportement de structures comportant de voiles faiblement armés soumises à des chargements bi-directionnels.

2. GEOMETRIE DE LA MAQUETTE

La maquette d'échelle 1/3 comporte deux voiles en béton armé sans ouvertures et 6 étages (figure 2). Elle est liée avec la table sismique avec une semelle en béton armé. L'épaisseur des voiles est de 0.06 m et leur largeur de 0.90 m. Les joints de construction sont positionnés à mi-hauteur de chaque étage. Un système métallique est utilisé afin d'augmenter la rigidité dans la direction perpendiculaire au plan des voiles. Des masses concentrées sont ajoutées aux niveaux des étages pour prendre en compte les effets d'échelle. Les armatures verticales sont concentrées aux deux extrémités des voiles et le pourcentage des armatures horizontales est faible. L'arrêt des armatures ne se fait pas toujours à la même hauteur par rapport à l'étage supérieur.

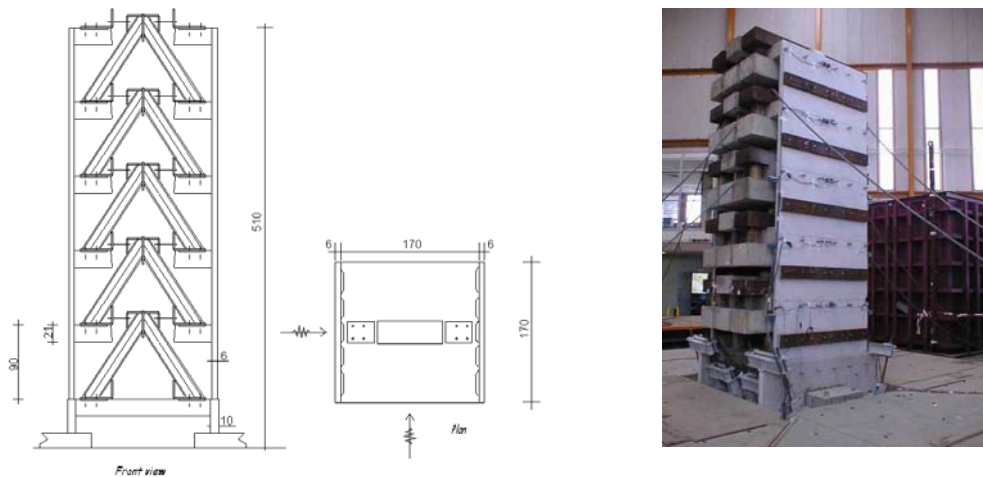


Figure 2 : Caractéristiques de la maquette.

3. DISCRETISATION

Pour la discrétisation spatiale de la structure CAMUS 2000-1 des éléments poutres 3D du code ABAQUS sont utilisés (Mazars *et al.* 2004). Les principales caractéristiques du maillage sont les suivantes :

- Cisaillement : Les éléments poutres sont de cinématique Timoshenko et prennent en compte la déformation due au cisaillement. Pour les calculs présentés ci-dessous la déformation due au cisaillement est considérée élastique et indépendante de comportement axial ou de flexion (même dans le régime non linéaire).

- Masses concentrées : Des masses concentrées sont considérées aux nœuds des éléments Timoshenko. L'utilisation d'une matrice de masse simplifiée ('lumped mass') au lieu d'une matrice consistante est privilégiée.

- Intégration : Les contraintes dans la section de chaque élément Timoshenko sont intégrées numériquement afin d'obtenir les relations force-moment/déformation - courbure dans la section. Les éléments de ce type sont valables pour n'importe quel matériau puisque chaque point d'intégration est traité séparément avec la loi de comportement y accordée.

- Le même type d'élément poutre avec plusieurs formes de section est utilisé pour la discrétisation des différentes parties de la structure (figure 3). Plus spécifiquement :

Murs : Des éléments de section rectangulaire sont utilisés pour la modélisation du béton dans les murs avec 25 points d'intégration dans la section. Les armatures horizontales sont prises en compte avec des éléments de section type « box » du code ABAQUS. Les barres qui ont la même distance par rapport à l'axe de l'élément sont modélisés avec le même élément - la surface des armatures étant transformée à une surface équivalente de la section «box». De cette façon la représentation des murs est possible à partir de la position géométrique de leur axe. 16 points d'intégration sont utilisés dans chaque section de type «box». Les masses additionnelles sont introduites comme des masses concentrées.

Étages : Des éléments de section rectangulaire ou de type « box » sont utilisés pour les étages. Des éléments de type « box » sont utilisés pour la partie centrale des étages ou un trou a été

prévu afin de pouvoir modéliser la connexion de système de contreventement avec les deux étages adjacents. Les masses positionnées sur les étages sont modélisées avec des éléments de type box. Leur densité est choisie afin de reproduire le poids réel. Leur rigidité a été limitée afin d'éviter leur influence au comportement dynamique de la structure.

Système de contreventement : Il est modélisé avec des éléments de section I dont la géométrie correspond à la géométrie réelle. 13 points d'intégration sont utilisés dans la section.

Semelle : Des éléments de section rectangulaires sont utilisés pour le béton et des éléments de type « box » pour les armatures. La partie inférieure de la structure est liée à la table sismique avec quatre éléments de section circulaire. Un pré chargement a été appliqué à ces éléments afin de reproduire correctement le chargement réel pendant l'essai.

Table sismique : Un élément rigide composé des éléments de section rectangulaire représente la table sismique. Des éléments de section circulaire sont utilisés pour simuler la flexibilité de la table. Leur rigidité a été fournie par le CEA. La densité des éléments est calculée afin d'avoir le poids réel de la table.

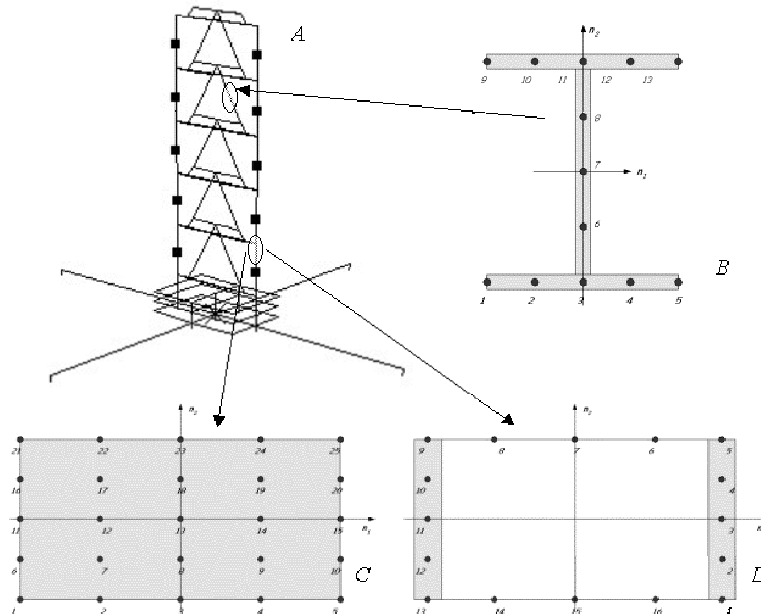


Figure 3 : A) Maillage de la structure B) Section adoptée pour le système de contreventement C) Eléments de section rectangulaire pour le béton D) Eléments de section de type « box » pour les armatures et les masses aux différents étages. La position et le nombre des points d'intégration sont aussi indiqués.

4. LOIS DE COMPORTEMENT DES MATERIAUX

Un modèle de plasticité avec écrouissage isotrope et des surfaces de charge de type von Mises est adopté pour le comportement non linéaire des armatures. Le comportement de béton sous chargement cyclique est simulé avec le modèle PRM (Rouquand *et al.* 1995). Les analyses sont effectuées avec la version explicite du code ABAQUS. PRM est basé sur la mécanique de l'endommagement et peut prendre en compte la diminution de raideur due à l'ouverture des fissures, la restauration due à la refermeture des fissures et les effets de vitesse (figure 4).

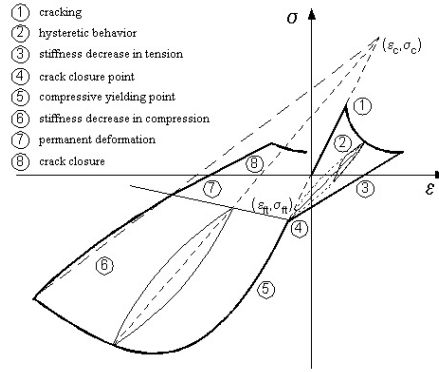


Figure 4: Réponse uni-axiale du modèle PRM.

5. CHARGEMENTS SISMIQUES

Les signaux utilisés pour les calculs sont ceux mesurés au niveau de la table (figure 5) afin de mieux reproduire les conditions expérimentales.

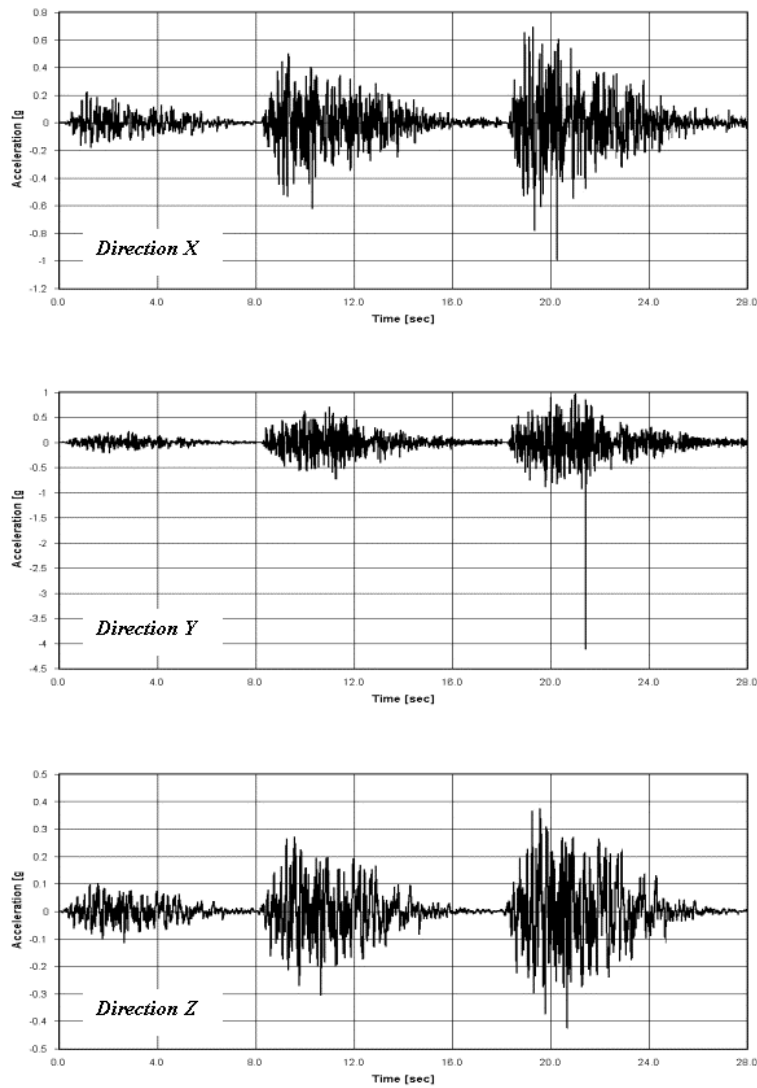


Figure 5: Chargements sismiques.

6. RESULTATS DE CALCULS

Pour l'analyse modale le comportement de béton est considéré linéaire. Les deux premières fréquences obtenues (5.5 et 6.02 Hz pour le comportement hors plan et dans le plan des voiles respectivement) sont très proches des résultats expérimentaux (5.45 et 6.00 Hz, figure 6).

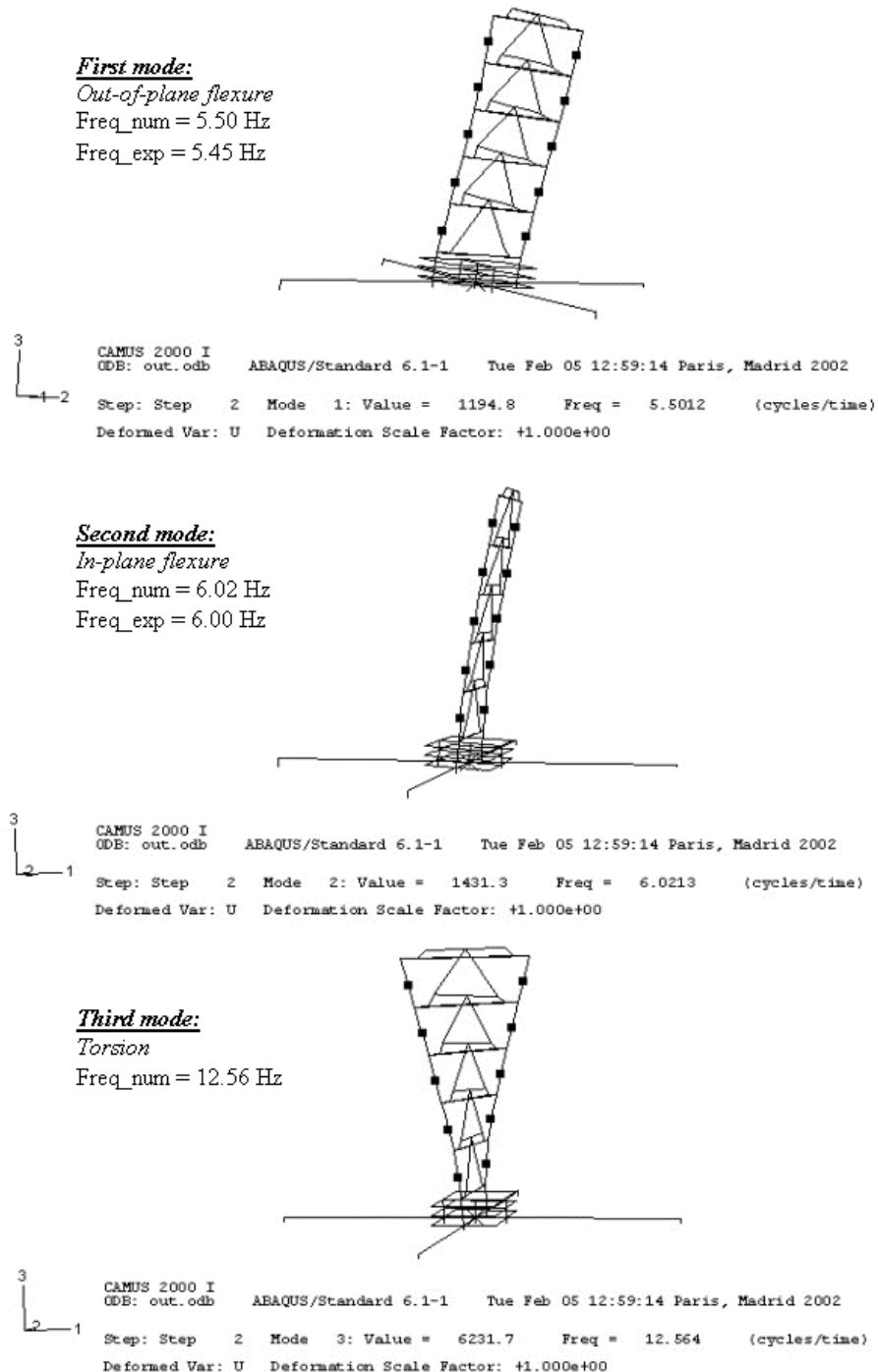


Figure 6 : Résultats de l'analyse modale.

Sept signaux d'amplitude croissante ont été appliqués pendant l'essai. Seulement trois sont utilisés pour les analyses numériques présentées ci-dessous afin de diminuer le temps de calcul nécessaire (0.15g, 0.4g et 0.55g). Les résultats numériques et expérimentaux sont comparés en terme de grandeurs globales et locales (figure 7 et 8). Seulement les résultats dans le plan des voiles sont

présentés. La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux prouve que le modèle simplifié reproduit correctement le comportement non linéaire de la maquette. Une légère différence apparaît au niveau 0.4g. Cette différence résulte de dommages dont la structure a souffert lors des séquences qui ne sont pas prise en compte pour le calcul. Les résultats s'améliorent pour le niveau 0.55g, ce qui justifie cette hypothèse. L'étude des graphiques représentant l'effort axial montre que les accélérogrammes horizontaux induisent non seulement des moments de flexion mais aussi une variation de l'effort axial de l'ordre de poids propre de la structure (36 tonnes).

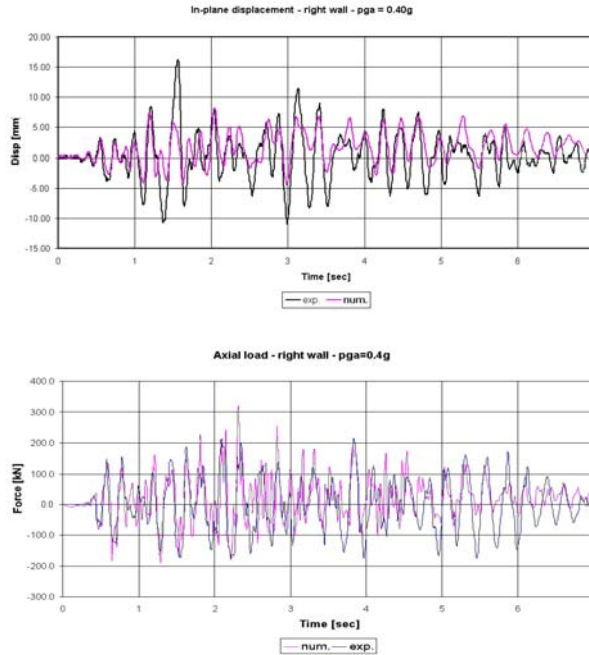


Figure 7: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux. Déplacement dans le plan des voiles et effort normal en fonction de temps (0.4g mur droit).

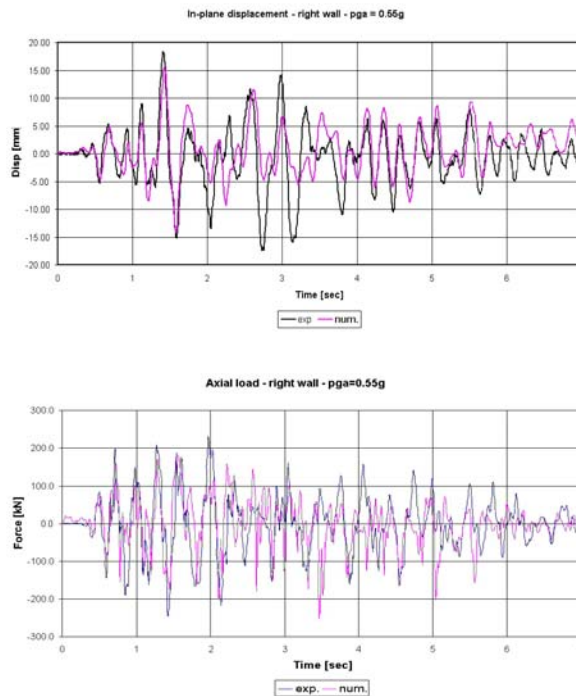


Figure 8: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux. Déplacement dans le plan des voiles et effort normal en fonction de temps (0.55g d mur droit).

La combinaison de flexion bi-axiale et de cisaillement provoque aussi un état de contraintes complexe dans la structure. Le modèle utilisé, basé sur la théorie de l'endommagement, permet de visualiser l'état de déformations aux différents points d'intégration dans la section (figure 9). Les effets de compression et de traction sont considérés indépendamment. Les effets de traction sont concentrés à la base des murs et diminuent avec la hauteur. Au contraire, la compression provoque de l'endommagement seulement au premier étage et plus particulièrement entre la fondation et la connexion avec le premier étage où l'endommagement maximal apparaît (pendant l'essai la structure a aussi été endommagée à cet endroit).

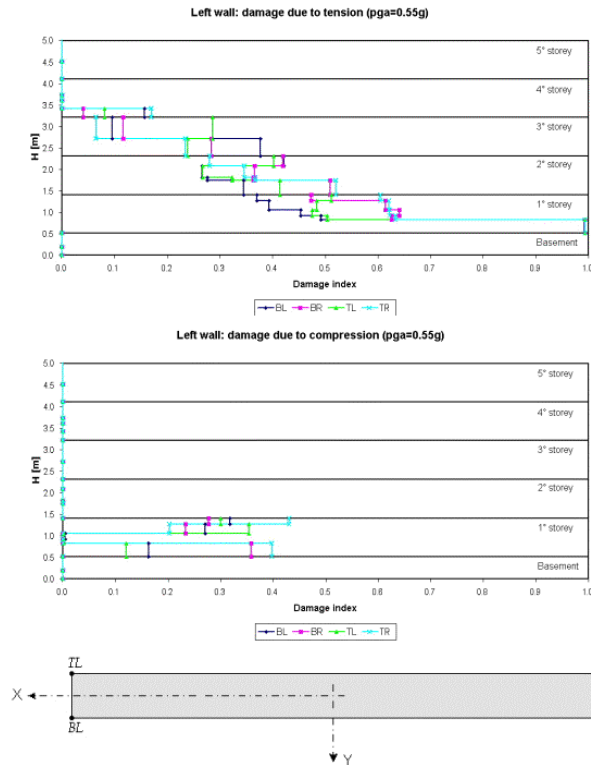


Figure 9 : Endommagement dû à la traction et à la compression aux 4 coins de mur gauche (0.55g).

7. BIBLIOGRAPHIE

- Guedes J., Pégon P., Pinto A. (1994) « A fibre Timoshenko beam element in CASTEM 2000 » special publication Nr. I.94.31, JRC, I-21020 Ispra, Italy.
- Kotronis, P., Davenne, L. and Mazars, J. (2004) « Poutre 3D multifibre Timoshenko pour la modélisation des structures en béton armé soumises à des chargements sévères » *Revue Française de Génie Civil*, 8(2-3), 329–343.
- Kotronis P., Mazars J. (2005) « Simplified modelling strategies to simulate the dynamic behaviour of R/C walls » *Journal of Earthquake Engineering* vol. 9, issue 2, pp. 285-306.
- Mazars J., Ragueneau Fr., Casaux G., Colombo A., Kotronis P. (2004) « Numerical modelling for earthquake engineering: the case of lightly RC structural walls ». *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 28, issues 7-8, pp. 857 - 874.
- Petrangeli, M., Pinto, P.E., Ciampi, V. (1999) « Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structures. I: Theory » *J. Engrg. Mech*, 125(9), 994–1001.
- Rouquand, A., Pontiroli, C. (1995) « Some Considerations on Implicit Damage Models Including Crack Closure Effects and Anisotropic Behaviour ». *Proceedings FRAMCOS-2*, Ed. F.H. Wittmann, AEDIFICATIO Publisher, Freiburg.
- Spacone E., Filippou F.C., Taucer, F.F. (1996) « Fiber Beam-Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frames. I : Formulation » *Earthquake Eng. and Struct. Dynam.*, Vol. 25, N. 7, pp. 711-725.