

## Modélisation du comportement dynamique de portiques en béton armé consécutif à un fort endommagement structural initial.

Jean-Luc HANUS<sup>1</sup>, Mathieu REIMERINGER<sup>2</sup> & Patrice BAILLY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Energétique Explosions Structures UPRES-EA 1205  
ENSI Bourges et Université d'Orléans  
88 boulevard Lahitolle, 18020 Bourges Cedex

<sup>2</sup> INERIS, Parc Technologique ALATA, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte  
jean-luc.hanus@ensi-bourges.fr

### Résumé :

*Nous présentons dans cette communication des simulations complètes d'effondrement progressif de structures planes de type portiques, obtenues au moyen d'une approche discrète simplifiée. Cette démarche originale repose sur l'utilisation de macro-éléments discrets de poutre équivalents aux éléments finis de poutre de Timoshenko ; le comportement des matériaux est localisé dans des liaisons rhéologiques entre corps rigides. L'atout d'une telle approche est de permettre de décrire complètement l'évolution de la structure depuis son état initial jusqu'à sa ruine sans nécessiter, contrairement aux approches continues comme les éléments finis, l'ajout de degrés de libertés supplémentaires et une redéfinition des connectivités entre éléments.*

### Abstract :

*We present in this communication progressive collapse simulations of reinforced concrete frame structures. The method suggested is based on the use of macro-discrete beam elements equivalent to the classical Timoshenko beam finite element. Unlike usual finite element approaches, this alternative procedure can completely describe the collapse from initial damage to residual structure without requiring to add nodes or to redefine elements connectivity.*

### Mots-clefs :

**effondrement ; macro-éléments discrets ; portique**

## 1 Introduction

Des sollicitations accidentelles sur un ouvrage, comme le souffle d'une explosion ou une collision, peuvent conduire, lorsqu'elles sont sévères, à sa ruine. On parlera ainsi d'effondrement progressif lorsque les dommages résultants sont disproportionnés par rapport à l'endommagement structural initial. La catastrophe de Ronan Point en Angleterre en 1968 en est l'exemple le plus caractéristique : une bonbonne de gaz ayant explosé au dix-huitième étage a provoqué l'effondrement en chaîne des étages inférieurs du coin sud-est de la tour.

Les approches classiques statiques, ne prenant pas en compte la redistribution dynamique des efforts et les chocs, peuvent se révéler non conservatives lorsqu'il s'agit d'étudier la vulnérabilité d'une structure vis à vis d'évènements extrêmes.

Malgré la progression des moyens de calculs, les simulations tridimensionnelles dynamiques complètes par la méthode des éléments finis demeurent lourdes à mettre en oeuvre et leurs résultats non nécessairement plus fiables que ceux d'approches simplifiées avec l'utilisation de macro-éléments de poutre (voir par exemple Fajfar *et al.* (2005)). De plus, si la méthode des éléments finis s'avère un outil très performant d'analyse des structures qui demeurent continues, il n'en est pas de même pour la modélisation d'une structure soumise à une agression

accidentelle violente. Celle-ci est en effet susceptible de se fragmenter en de multiples sous structures.

C'est pour tenter de pallier ces difficultés qu'une approche alternative discrète bidimensionnelle est développée. Elle a pour but de proposer un outil de recherche simplifié suffisamment léger pour permettre des études paramétriques et des simulations avec aléa. Cette approche peut contribuer à une meilleure compréhension de phénomènes pour lesquels « l'intuition physique » est susceptible d'être mise en défaut en raison du manque de données expérimentales. Elle est basée sur l'utilisation de macroéléments discrets équivalents aux éléments finis de poutre de Timoshenko ; le comportement des matériaux est localisé dans des liaisons rhéologiques entre corps rigides. Elle a été récemment couplée à une détection géométrique précise des contacts entre macroéléments nécessaire pour modéliser les contacts et les chocs lorsque des liaisons sont rompues (Hanus *et al.* (2007)).

Après un exposé de la méthodologie, nous présentons des simulations complètes d'effondrement progressif de portiques en béton-armé. L'endommagement structural initial est supposé connu et l'on s'intéresse au comportement « ultime » de la structure lorsque, suite à des ruptures de liaisons, de multiples contacts et chocs entre éléments de la structure se produisent.

## 2 Présentation de la démarche et des choix de modélisation retenus

La contrainte principale qui a guidé nos choix de modélisation est celle de la rapidité de calcul. Nous avons donc privilégié :

- une description à l'échelle globale du comportement des matériaux de type résistance des matériaux, basée sur des hypothèses cinématiques simplifiées ;
- une intégration temporelle explicite des équations de mouvement par l'algorithme des «différences centrées» ;
- une gestion explicite des contacts basée sur l'école des corps déformables.

### 2.1 Élément discret de poutre à l'échelle globale

Tous les éléments constitutifs de nos portiques, poutres et colonnes, sont modélisés comme un ensemble de corps rigides reliés par des liaisons rhéologiques permettant de définir un comportement global, tant linéaire que non linéaire, de type poutre. Cette formulation discrète s'inspire des analogies entre les éléments finis et les assemblages masse ressort RBSM (Rigid Body Spring Model) proposées par Kawai (1980) et Toi (1991).

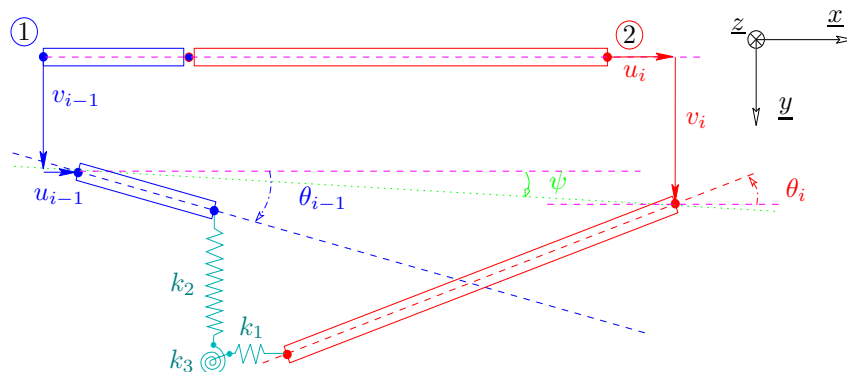


FIG. 1 – Élément discret  $e_i$

La géométrie actuelle de la liaison s'exprime en fonction des déplacements des centres de

gravité des blocs (voir figure 1) :

$$l^t = \sqrt{(X_i^t - X_{i-1}^t)^2 + (Y_i^t - Y_{i-1}^t)^2} ; \cos(\psi_t) = \frac{X_i^t - X_{i-1}^t}{l^t} ; \sin(\psi_t) = \frac{Y_i^t - Y_{i-1}^t}{l^t} \quad (1)$$

On retient comme déformations généralisées de l'élément de liaison :

$$\epsilon^t = \frac{l_t - l_0}{l_0} ; \gamma^t = \frac{\sin(\psi - \theta_i) + \sin(\psi - \theta_{i-1})}{2} ; \chi^t = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{l_0} \quad (2)$$

Tout modèle de comportement global reliant efforts généralisés  $\underline{\sigma} = \{N, M, V\}^T$  et déformations généralisées  $\underline{\epsilon} = \{\epsilon, \chi, \gamma\}^T$ , phénoménologique ou basé sur la thermodynamique des processus irréversibles avec jeu de variables internes  $\underline{\alpha}_k$ , peut être utilisé.

$$\dot{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{L}}(\underline{\sigma}, \underline{\epsilon}, \underline{\alpha}_k) \cdot \dot{\underline{\epsilon}} \quad (3)$$

Le centre de gravité des macro-éléments est positionné au niveau des noeuds éléments finis. Ainsi défini, notre macro-élément discret de poutre est équivalent à l'élément fini de poutre de Timoshenko avec intégration réduite, tant pour les efforts aux noeuds que pour l'énergie de déformation.

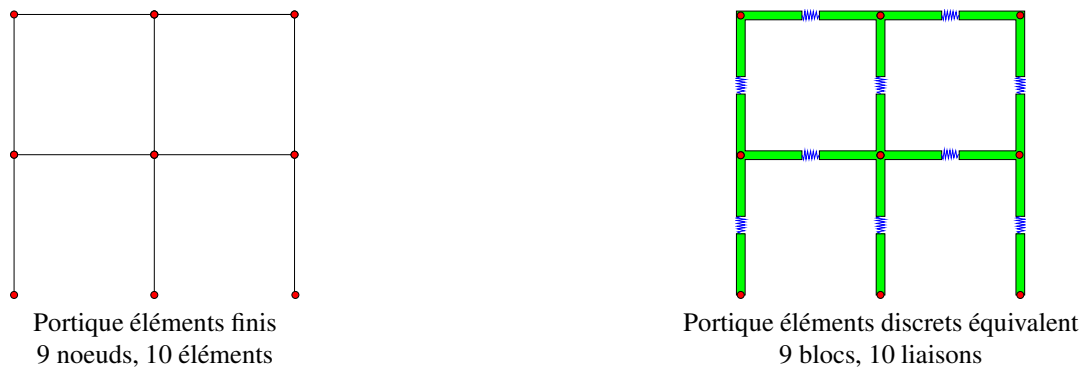


FIG. 2 – Comparaison maillage EF, maillage ED

La rupture d'une liaison est activée lorsqu'un critère global  $f(N, M, V) = 0$  est vérifié. Les efforts transmis par la liaison rhéologique sur les blocs sont alors annulés (cut-off). L'avantage d'une approche discrète apparaît alors pleinement : *le nombre de blocs et de liaisons demeure constant.*

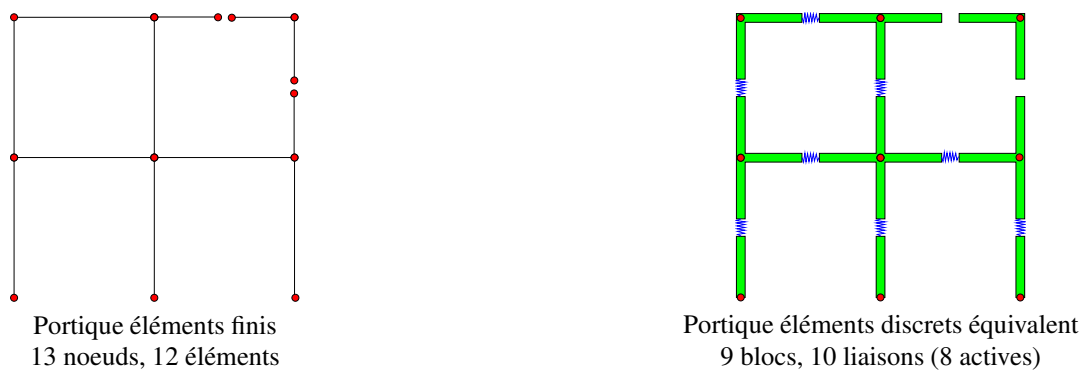


FIG. 3 – Comparaison maillage EF, maillage ED après rupture d'éléments

## 2.2 Intégration temporelle explicite

Les blocs sont des solides rigides soumis aux forces de gravité, aux efforts et moments transmis par les liaisons actives (exposant  $l$ ) et par les contacts (exposant  $c$ ) ; le cas échéant un amortissement structurel est ajouté.

$$m_i \ddot{x}_i = \sum_j X_j^l + \sum_k X_k^c + A_i^u \dot{x}_i \quad (4)$$

$$m_i \ddot{y}_i = \sum_j Y_j^l + \sum_k Y_k^c - m_i g + A_i^v \dot{y}_i \quad (5)$$

$$J_i \ddot{\theta}_i = \sum_j M_j^l + \sum_k M_k^c + A_i^\theta \dot{\theta}_i \quad (6)$$

Les dérivées sont approchées par différences finies :

$$x_i^{n+1} = 2x_i^n - x_i^{n-1} - \frac{A_i^x dt}{m_i} (x_i^n - x_i^{n-1}) + \frac{dt^2}{m_i} \left( \sum_j X_j^l + \sum_k X_k^c \right) \quad (7)$$

$$y_i^{n+1} = 2y_i^n - y_i^{n-1} - \frac{A_i^y dt}{m_i} (y_i^n - y_i^{n-1}) + \frac{dt^2}{m_i} \left( \sum_j Y_j^l + \sum_k Y_k^c - m_i g \right) \quad (8)$$

$$\theta_i^{n+1} = 2\theta_i^n - \theta_i^{n-1} - \frac{A_i^\theta dt}{J_i} (\theta_i^n - \theta_i^{n-1}) + \frac{dt^2}{J_i} \left( \sum_j M_j^l + \sum_k M_k^c \right) \quad (9)$$

## 2.3 Gestion des contacts

Si le comportement demeure unidimensionnel, la gestion des contacts est elle bidimensionnelle et porte sur l'enveloppe réelle des macro-éléments de poutre (Hanus *et al.* (2007)). La détection des contacts est réalisée au moyen d'une hiérarchie de boîtes englobantes et l'utilisation du théorème de l'axe de séparation (Lin *et al.* (1998)). Les efforts de contacts sont déterminés suivant l'école des corps déformables qui autorise une faible interpénétration des éléments (Cundall (1971)) :

- l'effort normal est, pour sa partie réversible, proportionnel à la distance d'interpénétration et, pour sa partie dissipative, proportionnel à la vitesse normale relative des deux éléments en contact :

$$F_n^{i \rightarrow j} = -K_n d_{ij} - m_{eff} \gamma v_{rel}^n \quad (10)$$

- l'effort tangentiel est déterminé de manière incrémentale, l'incrément étant proportionnel à la vitesse tangentielle relative des deux éléments en contact. Une loi de Coulomb est adoptée pour modéliser les frottements entre deux éléments :

$$\Delta F_t^{i \rightarrow j} = -K_t v_{rel}^t \Delta t \quad (11)$$

$$F_t^{i \rightarrow j} = -\min(|F_t^{i \rightarrow j}|, \mu |F_n^{i \rightarrow j}|) \frac{v_{rel}^t}{|v_{rel}^t|} \quad (12)$$

- ces efforts engendrent des moments sur les deux éléments en contact :

$$\underline{M}^{i \rightarrow j} = \underline{F}^{i \rightarrow j} \wedge \underline{P_c C^j} \quad (13)$$

avec  $K_n$  raideur normale associée au contact et  $K_t$  raideur tangentielle,  $m_{eff} = \frac{m^i m^j}{m^i + m^j}$  masse effective,  $\gamma$  coefficient d'amortissement et  $\mu$  coefficient de frottement.

### 3 Simulations d'effondrement

L'étude de l'effondrement progressif a été réalisée sur un portique à deux travées et quatre étages. Les poutres et colonnes, faiblement armées, sont chargées uniformément. Les calculs, avec une loi bilinéaire moment-courbure, sont menés en deux étapes :

- la structure est considérée initialement comme non endommagée et un amortissement structural est appliqué qui permet de retrouver la solution élastique statique du problème ;
- une charge accidentelle est supposée rompre une colonne et en «éjecter» une partie ; on impose ainsi la rupture de deux liaisons et l'application d'une vitesse horizontale au bloc central d'une colonne.

La stabilité du calcul est garantie en imposant que le pas de temps soit inférieur à la condition de CFL et à la demi-période de contact :  $\delta_t < \min \left\{ \pi \sqrt{\frac{m_{eff}}{K_n}}, \sqrt{\frac{ml}{ES}} \right\}$ .

Comme l'illustre la figure ci-dessous, la démarche proposée permet effectivement de décrire les différentes phases du comportement de la structure jusqu'à sa ruine totale.

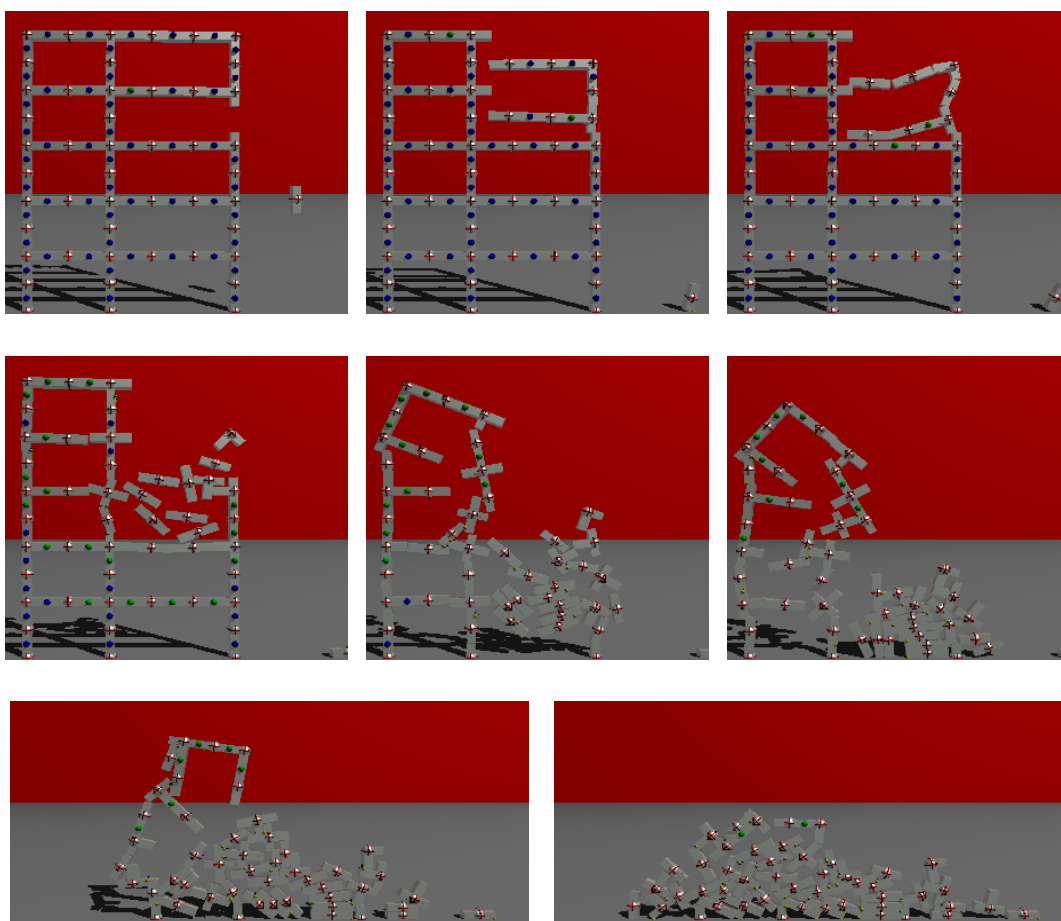


FIG. 4 – Effondrement progressif d'un portique en béton armé

Une étude paramétrique a été menée permettant de déterminer, suivant l'étage où a lieu l'initiation de la rupture, le chargement maximal d'exploitation admissible n'engendrant pas de non linéarité et celui n'engendrant qu'un endommagement partiel de la structure (voir tableau 1). Le chargement dit de « référence » correspond au chargement minimal pour lequel, dans le cas le plus défavorable (rupture provoquée à l'étage 4), apparaît un comportement non linéaire.

<i>Intensité du chargement</i>	<i>Lieu d'initiation de la rupture</i>	<i>Comportement de la structure</i>	<i>Effondrement du portique</i>
référence	Etage 4	non linéaire	<b>partiel</b>
réf. +17%	————	non linéaire	<b>complet</b>
réf. +33%	Etage 3	élastique	aucun
réf. +50%	————	non linéaire	<b>complet</b>
référence	Etage 2	élastique	aucun
réf. +17%	————	élastique	aucun
réf. +33%	————	non linéaire pour 2 liaisons	aucun
réf. +50%	————	non linéaire	<b>complet</b>
réf. +17%	Etage 1	élastique	aucun
réf. +33%	————	non linéaire pour 3 liaisons	aucun
réf. +50%	————	non linéaire	<b>complet</b>
référence	Rez de chaussée	élastique	aucun
réf. +33%	————	non linéaire	<b>partiel</b>
réf. +50%	————	non linéaire	<b>complet</b>

TAB. 1 – Etude paramétrique sur le chargement et le lieu d'initiation

#### 4 Conclusion

La démarche proposée permet de décrire les différentes phases d'effondrement d'une structure de type portique. Simplifiée et de ce fait « peu gourmande » en temps CPU, elle autorise la réalisation d'études paramétriques pour quantifier sa *susceptibilité à l'effondrement progressif*.

Les améliorations prioritaires à venir porteront sur : le développement d'une loi de comportement globale décrivant l'interaction entre efforts généralisés, l'écriture d'un critère de rupture avec effort tranchant nécessaire à la modélisation de l'endommagement structurel initiant l'effondrement.

#### Références

- Cundall P. A., « A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems », *Symposium of the international society of rock mechanics*, vol. 1, Nancy, pp. 132-150, 1971.
- P. Fajfar P., Fischinger M. and M. Dolšek, « Macro-Models and Simplified Methods for Efficient Structural Analysis in Earthquake Engineering », *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, 13-17 June 2004, Bled, Slovenia*, vol. 194, NATO Science Series : Computer and Systems Sciences, pp. 22-49, 2005.
- Hanus J. L., Lachapèle H. and Bailly P., « Gestion des contacts 2D dans une approche par macro-éléments discrets de l'effondrement de portiques en béton-armé », *8<sup>ième</sup> colloque national en Calcul de Structures*, Giens, Mai, 2007.
- Kawai T., « Some considerations on the finite element method », *Int. J. for Num. Meth. in Eng.*, vol. 16, n° 1, pp. 81-120, 1980.
- Lin M. C., Gottschalk S., « Collision detection between geometric models : A survey », *IMA Conference on Mathematics of Surfaces*, Budapest, p. 37-56, 1998.
- Toi Y., « Shifted integration technique in one-dimensionnal plastic collapse analysis using linear and cubic finite elements », *Int. J. for Num. Meth. in Eng.*, vol. 31, n° 8, pp. 1537-1552, 1991.