



HAL
open science

Effondrement de structures en béton armé: une approche par éléments discrets

Mathieu Reimeringer, Jean-Luc Hanus, Krzysztof Woznica

► **To cite this version:**

Mathieu Reimeringer, Jean-Luc Hanus, Krzysztof Woznica. Effondrement de structures en béton armé: une approche par éléments discrets. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813021

HAL Id: hal-01813021

<https://hal.science/hal-01813021>

Submitted on 12 Jun 2018

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.

Public Domain

Effondrement de structures en béton armé : une approche par éléments discrets

Mathieu Reimeringer^{*,} — Jean-Luc Hanus^{**} — Krzysztof Woznica^{**}**

** INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et du Risque)
Parc Technologique ALATA, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte*

*** Laboratoire Energétique Explosions Structures*

*ENSI de Bourges et Université d'Orléans
10 boulevard Lahitolle, F-18020 Bourges Cedex
{mathieu.reimeringer, jean-luc.hanus, krzysztof.woznica}@ensi-bourges.fr*

RÉSUMÉ. Une démarche visant à décrire l'effondrement de portiques en béton et béton armé est présentée dans ce travail. Elle pourrait contribuer à fournir des informations pour enrichir, dans le domaine de la résistance aux actions accidentelles, les règlements et les méthodes de la construction en génie civil. Cette approche simplifiée repose sur l'utilisation d'éléments discrets : l'élément retenu est constitué de deux corps rigides reliés par des liaisons rhéologiques représentatives du comportement des matériaux constitutifs ; cet assemblage est équivalent, dans le domaine des petites perturbations, à l'élément fini de poutre de Timoshenko. Les équations de mouvement sont résolues au moyen d'un algorithme de différences finies centrées explicite. La démarche proposée permet potentiellement de décrire entièrement le processus d'effondrement d'un portique en béton armé en prenant notamment en compte : la redistribution dynamique des efforts, les ruptures (séparation des éléments constitutifs) et les contacts.

ABSTRACT. In this work, a progressive collapse procedure is presented. This simplified approach is based on the use of discrete elements: the element selected consists of two rigid bodies connected by rheological connections representative of the behavior of constitutive materials; it is equivalent, with the small deformation hypothesis, to the classical Timoshenko beam finite element. The equations of motion are solved with an explicit finite differences scheme. Combined with contact detection, this procedure can thus completely describe the process of collapse of a concrete frame structures while taking into account: dynamic load redistribution, rupture and separation of the components, contacts.

MOTS-CLÉS : effondrement, éléments discrets, béton armé

KEYWORDS: progressive collapse, discrete elements, reinforced concrete

1. Introduction

Si dès les années 70, suite à la catastrophe de Ronan Point en 1968, des règles de dimensionnement ont été proposées pour tenter de prévenir l'effondrement en chaîne de bâtiments [ELL 78], on assiste depuis la tragédie du 11 septembre 2001 à un regain d'intérêt pour ce domaine d'étude. Les règles d'ingénieries simples, qui visent à quantifier et à limiter la vulnérabilité d'un édifice à ce phénomène ont ainsi été affinées [ASC 02], [GSA 03], [CEN 00] mais demeurent incomplètes, notamment en ce qui concerne les actions accidentelles de type chocs ou explosions.

Les eurocodes [CEN 00], future norme européenne en matière de règles de construction, n'échappent pas à cette constatation. Ainsi, si les eurocodes insistent sur la notion intéressante d'éléments clefs dont la définition est donnée comme « un élément de structure essentiel pour la stabilité d'ensemble de cette dernière, dont la défaillance causerait des dommages disproportionnés et/ou l'effondrement de la structure », ils ne fournissent pas de méthode pour déterminer ces éléments.

Cette notion d'éléments clefs se retrouve dans les règles de construction américaines [ASC 02] et dans les recommandations pour lutter contre le terrorisme [GSA 03], [DOD 03]. Comme dans les codes européens, le constructeur est encouragé à dimensionner soigneusement les éléments clefs pour qu'ils résistent à l'accident. Ces règles de construction présentent également l'originalité d'introduire une méthode censée garantir les bâtiments contre l'effondrement. Dans cette démarche, nommée « the alternate load path method », l'ingénieur en structures doit effectuer une série de calculs statiques en retirant un des éléments clefs et vérifier, à chaque fois, si la nouvelle structure atteint un état ultime. Les contributions de plusieurs auteurs [GIL 98], [KAE 04], [REI 03] ont toutefois montré les limites de ce type d'approche qui négligent les effets dynamiques inhérents au phénomène d'effondrement (redistribution des chargements, chocs,...).

L'effondrement en chaîne est un phénomène difficile à modéliser tant les mécanismes mis en jeu sont nombreux : non-linéarités matérielles (plasticité, endommagement, rupture,...) et géométriques (chute libre, contact,...). De plus, si l'outil de simulation est destiné à rendre des données prédictives en génie civil, il doit permettre d'obtenir des résultats avec un coût et un temps de calcul raisonnables.

C'est pour tenter de répondre à ces différentes contraintes que nous proposons une approche simplifiée originale, reposant sur l'utilisation d'éléments discrets, pour l'étude de l'effondrement de portiques en béton armé.

2. Formulation des éléments discrets

Les poutres et colonnes, éléments constitutifs du portique, sont modélisés comme des corps rigides avec les dimensions et les inerties adéquates, le comportement des matériaux étant supposé localisé dans les liaisons rhéologiques entre les corps rigides. Cette formulation discrète s'inspire des analogies entre les éléments finis unidimen-

sionnels et les assemblages masse ressort RBSM (Rigid Body Spring Model) proposées par Toi [TOI 91] dans le domaine des petites perturbations.

2.1. Présentation de l'élément

L'élément retenu est composé de deux blocs indéformables reliés par des ressorts permettant de reprendre les efforts normaux, tranchants et le moment fléchissant (voir Figure 1).

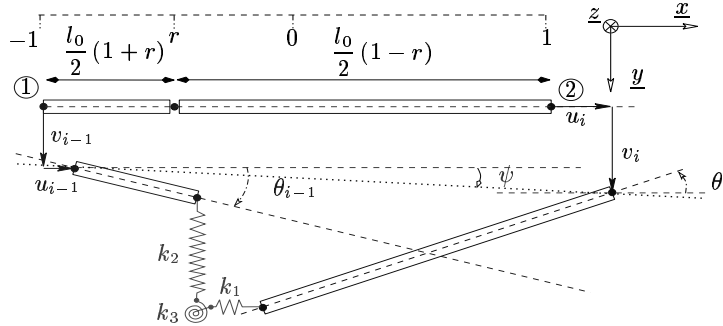


Figure 1. Élément discret e_i

Les efforts de liaison des deux blocs valent :

$$N = k_1 (u_i - u_{i-1}) \quad ; \quad M = k_3 (\theta_i - \theta_{i-1})$$

$$V = k_2 \left[(v_2 - \frac{L}{2}(1-r)\theta_2) - (v_1 + \frac{L}{2}(1+r)\theta_1) \right]$$

On montre alors que, sous réserve de choisir : deux blocs de longueur identique ($r = 0$) et des raideurs pour les ressorts $k_1 = \frac{ES}{l_0}$, $k_2 = \frac{GS}{l_0}$ et $k_3 = \frac{EI}{l_0}$, cet élément est équivalent, tant du point de vue de l'énergie de déformation que des efforts aux noeuds, à l'élément fini de poutre de Timoshenko avec intégration réduite dans le domaine de l'élasticité linéaire

Dans le cadre de l'étude de l'effondrement de portiques en béton armé, on suppose que les déplacements peuvent être grands mais que les déformations restent petites. On propose alors des variables de déformations globales, reliées aux efforts de liaison dans le domaine de l'élasticité linéaire, de la manière suivante :

$$\begin{Bmatrix} N_i \\ V_i \\ M_i \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \epsilon_i \\ \gamma_i \\ \chi_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ES}{l_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{GS}{l_0} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{EI}{l_0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{l_i - l_0}{l_0} \\ \frac{\sin(\psi - \theta_i) + \sin(\psi - \theta_{i-1})}{2} \\ \frac{\theta_i - \theta_0}{l_0} \end{Bmatrix}$$

2.2. Comportement des sections en béton armé

Les relations établies précédemment ne sont valables que dans le domaine de l'élasticité linéaire. La matrice de comportement $[K]$ est adaptée pour tenir compte du comportement non linéaire des sections. Le schéma de comportement simplifié retenu (bilinéaire en moment-courbure) tient toutefois compte de l'interaction effort normal-moment fléchissant.

Dans le cadre d'un processus dynamique d'effondrement, cinq phases peuvent ainsi être sommairement distinguées (voir Figure 2).

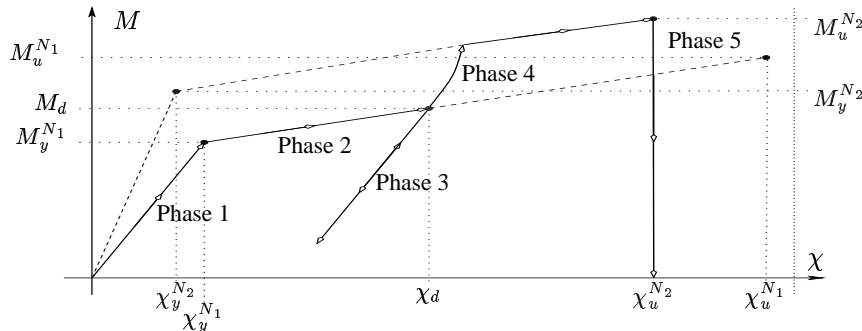


Figure 2. Phases de comportement

1) Phase élastique linéaire : le comportement suit la courbe enveloppe en (M, χ) déterminée à partir de l'effort normal auquel est soumis l'élément au début de l'effondrement : $M_i = E^{N_1} I \chi_i$

2) Phase de plastification : après atteinte du moment de plastification $M_y^{N_1}$, la relation devient $M_i = M_y^{N_1} + \alpha_p^{N_1} (\chi_i - \chi_y^{N_1})$ où $\alpha_p^{N_1}$ représente la raideur à la plastification supposée constante ;

3) Phase de décharge-recharge : elle correspond à un relâchement du moment pendant la phase de plastification. La relation moment courbure devient : $M_i = M_d + E^{N_1} I (\chi_i - \chi_d)$

4) Phase de transition : lorsque les valeurs M_d, χ_d sont une nouvelle fois atteintes, il y a transition de la courbe enveloppe associée à l'effort N_1 à celle associée à l'effort N_2 . Une fois que la transition est effectuée, le comportement demeure sur la courbe enveloppe correspondant à l'effort N_2 ;

5) Phase de rupture : quand le moment ultime est atteint, il y a détachement des blocs, tous les efforts d'interaction entre les blocs sont alors égaux à zéro.

3. Gestion des contacts

Deux types de contacts sont envisagés : le contact au sol où un bloc interagit avec le sol qui reste rigide et le contact entre éléments ou deux blocs interagissant entre

eux. La gestion du contact est inspirée des formulations éléments discrets et est incrémentale [SAW 98], [HEN 04].

4. Applications

– La première illustration porte sur le comportement élastoplastique d'un portique en béton armé pour lequel la colonne du rez-de-chaussée du côté droit se rompt soudainement à cause d'un chargement accidentel. Kaewkulchai et al. [KAE 04] ont réalisé une analyse dynamique par éléments finis (éléments de poutre du type Bernoulli-Euler). Nous avons effectué la même simulation avec les éléments discrets. On observe un écart de l'ordre de 1% en période et 3% en déplacements.

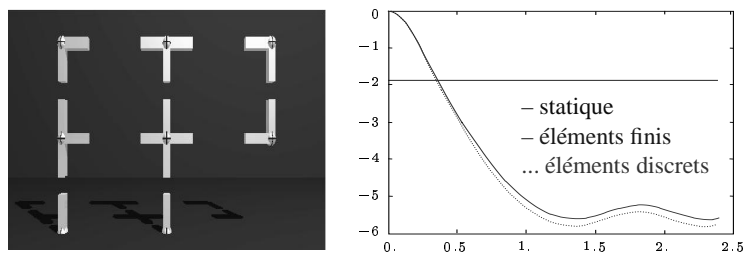


Figure 3. Vue éclatée du portique et comparaison éléments finis - éléments discrets

– La seconde illustration porte sur un portique en béton dont le comportement est supposé élastique fragile. La structure choisie est une réduction au dixième du portique central de la maquette ELSA [NEG 94]. La simulation permet de mettre en évidence : la redistribution des efforts, les ruptures et les chutes libres d'éléments ainsi que la cinématique d'effondrement.

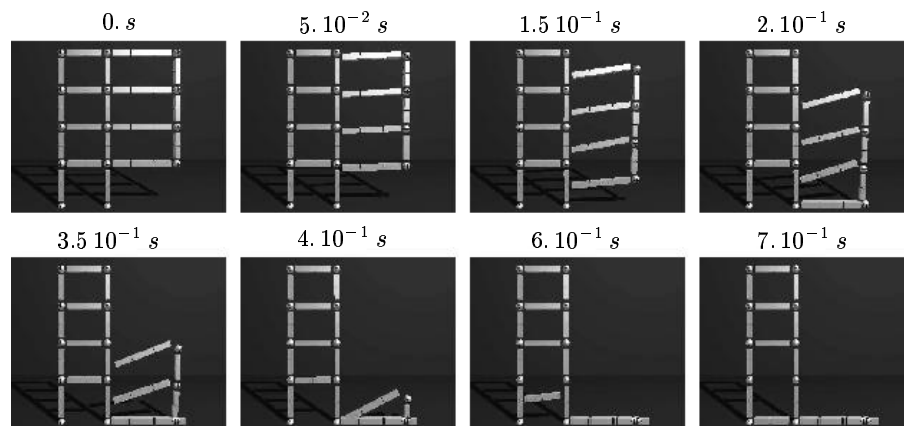


Figure 4. Cinématique d'effondrement

5. Conclusion

Une démarche pour l'étude de l'effondrement progressif de portiques en béton armée a été proposée. Cette approche, qui repose ici sur l'utilisation d'éléments discrets équivalents aux éléments finis de poutre de type Timoshenko, permet de représenter tant le comportement linéaire que le comportement non linéaire des éléments constitutifs du portique. Un de ses atouts, directement lié au type de modélisation discrète envisagé, est de permettre naturellement la poursuite d'une simulation dynamique lorsqu'un ou plusieurs éléments sont rompus.

6. Bibliographie

- [ASC 02] ASCE, « Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures », rapport n° SEI/ASCE 7-02, 2002, American Society of Civil Engineers.
- [CEN 00] CEN, « Eurocode 1 : Bases de calculs sur les structures - Partie - 2-7 : Actions sur les structures - Actions accidentelles dues aux chocs et explosions », Projet de Norme n° PR NF EN 1991-2-7, décembre 2000, Comité Européen de Normalisation.
- [DOD 03] DoD, « Unified Facilities Criteria : Dod Minimum Antiterrorism Standards for Buildings », rapport n° UFC 4-010-01, octobre 2003, USA Departement of Defense.
- [ELL 78] ELLINGWOOD B., LEYENDECKER B., « Approaches for design against progressive collapse », *J. Struct. Div.*, ASCE, vol. 104, n° 265, 1978, p. 413-423.
- [GIL 98] GILMOUR J., VIRDI K., « Numerical modelling of the progressive collapse of framed structures as a result of impacts or explosion », *2nd Int. Phd Symposium in Civil Engineering*, Budapest, 1998.
- [GSA 03] GSA, « Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects », rapport, juin 2003, US General Services Administration.
- [HEN 04] HENTZ S., DONZE F., DAUDEVILLE L., « Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates », *Computers and structures*, vol. 82, n° 29-30, 2004, p. 2509-2524.
- [KAE 04] KAEWKULCHAI G., WILLIAMSON E., « Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis », *Computer and Structures*, vol. 82, 2004, p. 639-651.
- [NEG 94] NEGRO P., VERZELETTI G., MAGONETTE G., PINTO A., « Tests on a Four-Storey Full-Scale R/C Frame Designed According to Eurocodes 8 and 2 », Preliminary Report n° EUR 15879 EN, 1994, Joint Research Center, Italy, Ispra.
- [REI 03] REIMERINGER M., BAILLY P., G. M., « Etude du processus d'effondrement d'un bâtiment », *Congrès français de Mécanique*, Nice, septembre 2003.
- [SAW 98] SAWAMOTO Y., AL., « Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method », *Nuclear Engineering and Design*, vol. 179, n° 2, 1998, p. 157-177.
- [TOI 91] 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, 1991, p. 1537-1552.