



**HAL**  
open science

# Modélisation simplifiée pour l'endommagement des structures en béton armé sous sollicitations sévères

Panagiotis Kotronis, J. Mazars, L. Davenne

## ► To cite this version:

Panagiotis Kotronis, J. Mazars, L. Davenne. Modélisation simplifiée pour l'endommagement des structures en béton armé sous sollicitations sévères. Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, 2000, Toulouse, France. hal-01008487

**HAL Id: hal-01008487**

**<https://hal.science/hal-01008487>**

Submitted on 7 Jan 2020

**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.

# MODELISATION SIMPLIFIEE POUR L' ENDOMMAGEMENT DES STRUCTURES EN BETON ARME SOUS SOLLICITATIONS SEVERES

**Kotronis Panagiotis, Mazars Jacky, Davenne Luc**

Laboratoire de Mécanique et de Technologie, ENS Cachan / CNRS-UMR 8535 / Univ. Paris 6  
61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex France

## 1 INTRODUCTION

La simulation du comportement non-linéaire des voiles en béton armé soumis à des sollicitations sismiques est un problème prioritaire pour la communauté parasismique nationale et internationale. Les séismes récents à Kobe (Japon), Izmit (Turquie) et Athènes (Grèce) ont prouvé encore une fois le rôle primordial que tels éléments jouent pour la sécurité des ouvrages. Recevant la plus grande partie de l'effort sismique, les voiles conditionnent le comportement des structures à murs. Il est donc important de trouver des méthodes numériques adéquates pour simuler le comportement de différents types de voiles souvent rencontrés dans les bâtiments, les installations nucléaires etc.

L'équipe « Modélisation des ouvrages sous sollicitations extrêmes » du Laboratoire de Mécanique et de Technologie (LMT) a depuis des années privilégié la recherche vers la mise au point de méthodes simplifiées, fiables et rapides pour le calcul du comportement non linéaire des structures. Pour des voiles ordinaires - élancement supérieur à 1.0 - une stratégie de modélisation a été déjà proposée (Mazars et al 1999, Ragueneau 1999). La méthode consiste à utiliser des éléments poutres multicouches de type Bernoulli, capables de simuler le comportement des voiles, dominés par la flexion. La loi constitutive du béton est basée sur la mécanique de l'endommagement. Pour des problèmes de murs d'élancement voisin de 1.0 où le cisaillement est prépondérant, une approche nommée 1.5D a été développée (Dubé 1997). Dans ce cas, des poutres de type Timoshenko sont utilisées et le cisaillement est pris en compte par une contribution non-linéaire des contraintes de cisaillement dans la section. La méthode a été appliquée avec succès pour la modélisation de la maquette NUPEC (élancement 0.7).

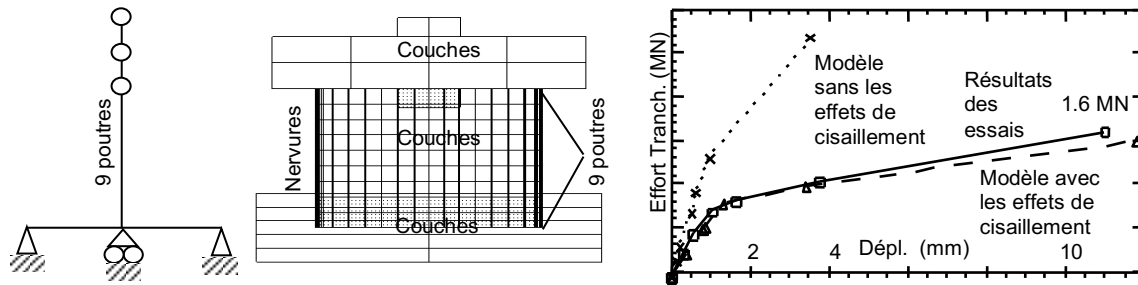


Figure 1 : NUPEC - Maillage et déplacement en tête - approche 1.5D (Mazars et al 1997).

Le programme expérimental SAFE, organisé par EDF-COGENA, concernait des essais de voiles en béton armé d'un élancement de l'ordre de 0.4, dont la rotation en tête est bloquée. La procédure 1.5D appliquée dans le cas de la maquette T5 du programme n'a pas donné des résultats satisfaisants. Le comportement linéaire de la maquette est bien simulé, néanmoins, le modèle n'arrive pas à suivre l'évolution non-linéaire (figure 2).

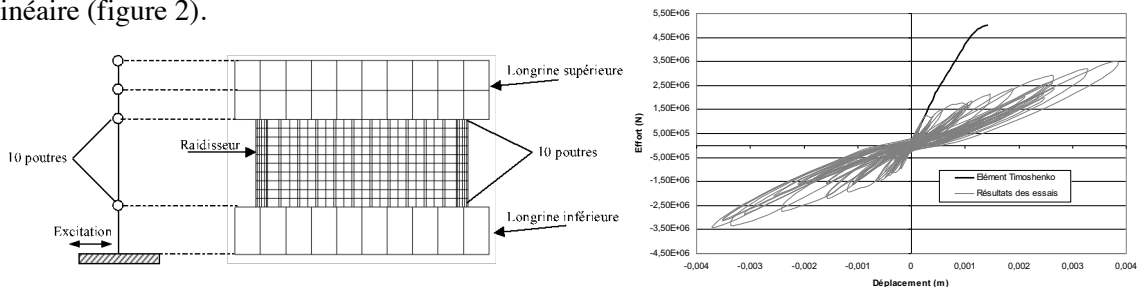


Figure 2 : T5 -Maillage et déplacement en tête - approche 1.5D.

Pour avancer sur la résolution de ce type de problème tout en restant dans le cadre des méthodes simplifiées, une nouvelle stratégie de modélisation est présentée capable de reproduire le comportement des maquettes SAFE. Le modèle du « béton armé équivalent » appartient à la famille des modèles « lattices » et

constitue, comme nous allons le montrer, une nouvelle méthode, fiable et facile à utiliser, pour simuler le comportement des voiles élancés soumis à des sollicitations sismiques.

## 2 PRINCIPE DU BETON ARME EQUIVALENT

On considère un milieu équivalent non linéaire du matériau continu composite béton armé. Ce milieu équivalent est constitué par un réseau de barres représentatif, au sens du 'V.E.R' du matériau composite continu (figure 3). Un volume élémentaire de béton armé est supposé divisé en deux parties, un élément qui représente le béton (C) et deux barres qui représentent l'acier (une barre horizontale  $S_H$  et une barre verticale  $S_V$ ). La liaison entre le béton et l'acier est supposée parfaite et leurs maillages sont découplés. Pour le béton, on utilise le motif le plus simple proposé par Hrennikoff (1941), constitué par six barres par maille. L'angle  $\alpha$  que les barres diagonales de compression forment avec les barres horizontales s'est avéré le paramètre crucial pour la réussite ou pas de la modélisation. Pour l'instant, on calibre cette valeur à partir des résultats expérimentaux ou sur la base d'un calcul élastique préliminaire (Kotronis et al 1999a). La section et la position des barres en acier doit respecter la section et la position du renforcement. Afin de simplifier le maillage, on peut néanmoins utiliser la méthode de distribution (la section des barres est proportionnelle à une surface correspondante). La symétrie du maillage est importante pour pouvoir prendre en compte la nature cyclique du chargement.

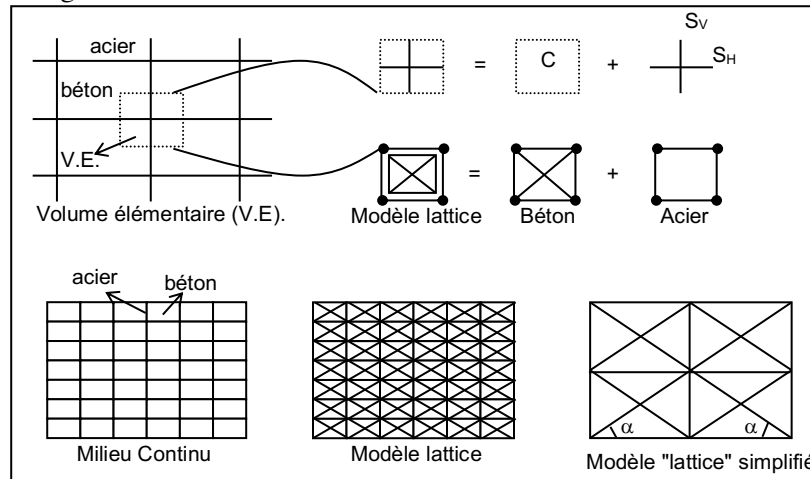


Figure 3: Béton armé équivalent

La loi constitutionnelle pour le béton est basée sur la mécanique de l'endommagement (La Borderie 1991) et est utilisée dans sa formulation uniaxiale (figure 4). Elle peut prendre en compte la création, l'ouverture et la refermeture des fissures et elle est caractérisée par deux variables d'endommagement (une pour la traction et une pour la compression). Pour l'acier, une loi de plasticité avec écrouissage linéaire est utilisée.

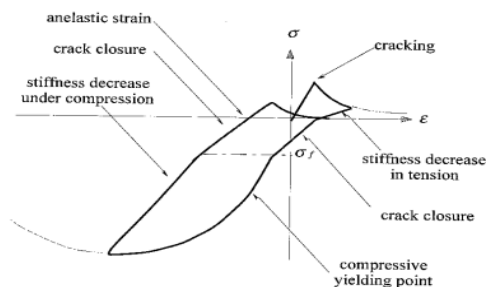


Figure 4: Réponse en traction - compression d'une éprouvette en béton

## 3 APPLICATION AU CAS DES MAQUETTES DU PROGRAMME SAFE

### 3.1 Description des maquettes T5 et T12

Il s'agit d'essais pseudo-dynamiques effectués dans le cadre du programme expérimental SAFE organisé par EDF – COGEMA (Pegon et al. 1998). Les essais ont eu lieu sur le mur de réaction de European Laboratory for Structural Assesment (ELSA) à Ispra en Italie. La modélisation des maquettes T5 et T12 du

programme selon le « Béton armé équivalent » est ici présentée. Les deux maquettes ont la même géométrie. La rotation de la longrine supérieure est bloquée. La maquette T12 est moins armée que la maquette T5 et supporte une contrainte normale à la base plus importante. Les murs, leurs raidisseurs, ainsi que les longrines supérieure et inférieure assurant le chargement sont représentés à la figure 5.

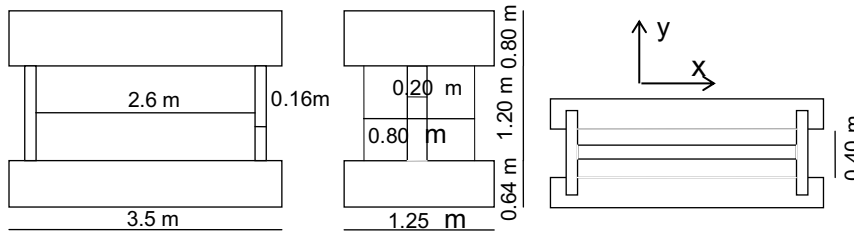


Figure 5: Description des maquettes T5 et T12 .

### 3.2 Modèle numérique pour les maquettes T5 et T12

#### 3.2.1 Maillage béton et acier

L'angle  $\alpha$  que les barres de compression diagonales forment avec les barres horizontales est égal à  $41.1^\circ$  pour la maquette T5 et  $30.1^\circ$  pour la maquette T12. Afin de simuler correctement les conditions limites de l'essai, la rotation des poutres supérieures est bloquée. Le seul mouvement de la partie supérieure autorisé est donc le déplacement horizontal et vertical.

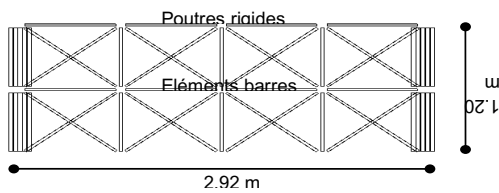


Figure 6 : Maillage béton T5 -  $\alpha = 41.1^\circ$

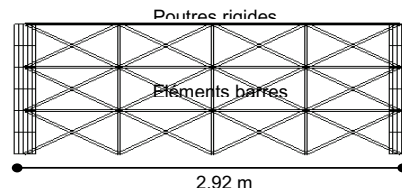


Figure 7 : Maillage béton T12 -  $\alpha = 30.1^\circ$ .

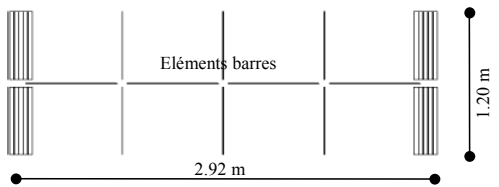


Figure 8 : Maillage acier T5

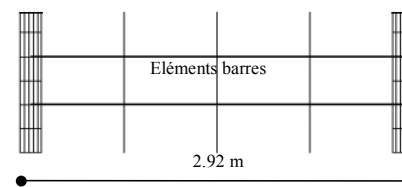


Figure 9 : Maillage acier T12.

#### 3.2.2 Simulations numériques

Le but des calculs effectués étant de qualifier la méthode numérique proposée, les maillages T5 et T12 ont été sollicités par la même «histoire» de déplacement que celle utilisée lors des essais. Les essais étant pseudodynamiques (effets inertiels introduits dans l'histoire des déplacements imposés) les calculs de qualification respectent les mêmes conditions de chargement cyclique lent. Ceci élimine les incertitudes numériques de l'essai et les incertitudes numériques d'un calcul dynamique (amortissement, intégration numérique). Les figures suivantes représentent les déplacements horizontaux imposés en tête des maquettes et les efforts tranchants mesurés à la base. Les résultats sont satisfaisants pour les deux maquettes et prouvent l'efficacité du « béton armé équivalent » à simuler le comportement non-linéaire des voiles de faible élancement (voir aussi Kotronis et al 1999a, 1999b).

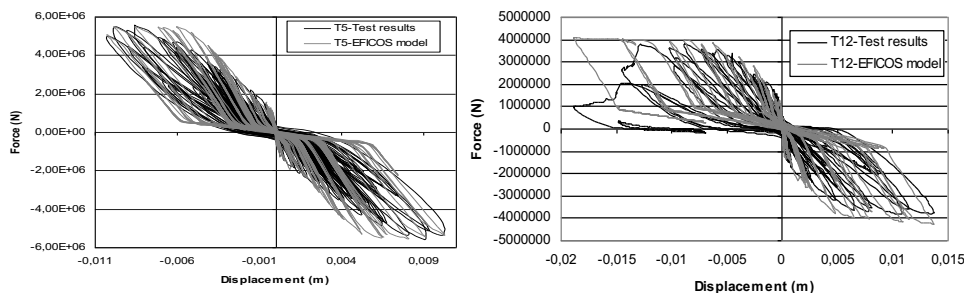


Figure 17 : T5 – Calcul cyclique.

Figure 18 : T12 – Calcul cyclique.

#### 4 CONCLUSIONS

Une nouvelle méthode simplifiée capable de simuler le comportement non linéaire des voiles de faible élancement sous sollicitation sismique est ici présentée. Basée sur les motifs proposés par Hrennikoff et couplée avec la mécanique de l'endommagement et la plasticité, le principe du « béton armé équivalent » arrive à bien représenter le comportement global des maquettes SAFE mais aussi de la maquette NUPEC (voir Kotronis 2000). Les éléments utilisés (poutres ou barres) sont familiers aux ingénieurs et apparaissent dans leur formulation la plus simple (cinématique de type Bernoulli). La loi utilisée pour le béton est uniaxiale et son implémentation dans un code ne pose pas de problèmes particuliers. L'utilisation des éléments multicouches nous donne en plus la possibilité de bien représenter la flexion exercée sur les raidisseurs des maquettes. Le coût en temps de calcul est tout à fait raisonnable, ce qui permet à l'utilisateur d'effectuer des études paramétriques. On a aussi montré l'importance de l'angle  $\alpha$  que les barres diagonales forment avec les barres horizontales. Sa valeur a été ici calibrée à partir des résultats expérimentaux. La recherche porte aujourd'hui sur l'élaboration d'une méthode prédictive. Les voies suivies sont l'établissement d'une relation entre l'angle  $\alpha$  et l'angle  $\theta$  des axes principaux juste avant la première fissuration ou de la relation entre l'angle  $\alpha$  et l'angle donné par la théorie du champ de compression etc. Le principe du « béton armé équivalent » est une méthode prometteuse, ayant un vaste domaine d'applications possibles. Elle pourrait être utilisée pour simuler le comportement des rotules plastiques développées aux joints (liaisons poteaux – poutres), aux extrémités des poutres, à la base des voiles ordinaires etc. L'implémentation dans un code commercial est envisageable sans de grandes difficultés pour simuler le comportement non-linéaire de bâtiments complets en 2D et même en 3D.

#### REFERENCES

- Dubé, J.F (1997). Modélisation multicouche des voiles en béton armé. *Revue française de génie civil*, volume 1, n° 2, juin, 285-307.
- Hrennikoff, A. (1941). Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method, *J.Appl.Mech.*, A169-A175 .
- Kotronis, P., Davenne, L. and Mazars, J. (1999a). Modélisation du comportement dynamique de murs à très faible élancement. *Rapport interne 223*, mars, LMT-Cachan
- Kotronis, P., Mazars, J., Chauvel, D., Dalbera, J. and Pegon, P. (1999b). Modèle de béton armé équivalent pour l'analyse du comportement des voiles de très faible élancement. Programme SAFE, *Vème Colloque National Génie Parasismique et réponse dynamique des ouvrages AFPS'99*, Vol II, pp 661-668.
- Kotronis, P. (2000). "Une nouvelle stratégie de modélisation des voiles faiblement élancés soumis a une sollicitation dynamique". Forum des associations du Génie Civil et urbain, AFGC-AUGC-IREX, Concours jeunes chercheurs, Lyon - INSA, juin.
- La Borderie, C.L. (1991). Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable: modélisation et application à l'analyse des structures en béton, *Thèse de doctorat Université Paris 6*.
- Mazars, J. and Ghavamian, S. (1997). Analyse non-linéaire du comportement sur table sismique d'un voile B.A. à faible élancement par une M.E.F. simplifiée. *15es Rencontres Universitaires de Génie Civil – Colloque EC'97 sur la Comparaison entre Résultats Expérimentaux et Résultats de Calculs*, Strasbourg (France), 22-23 Mai 1997, Vol2, pp. 439-446, AUGC.
- Mazars, J., Kotronis P. and Ghavamian, Sh. (1999). Stratégie de modélisation de type poutre pour une large variété de problèmes sismiques. *Vème Colloque National, Génie Parasismique et réponse dynamique des ouvrages. AFPS'99*, Vol II, pp 525-533.
- Pegon, P., Magonette, G., Molina, F.J., Verzeletti, G., Dyngeland, T., Negro, P., Tirelli, D. and Tognoli, P. (1998). *Programme SAFE :Rapport du TEST T5 - T12, JRC*.
- Ragueneau, Fr. (1999). Fonctionnement dynamique des structures en béton – Influence des comportement hystérétiques locaux. Thèse de doctorat ENS Cachan.