



**HAL**  
open science

**Modèle de béton armé équivalent pour l'analyse du  
comportement des voiles de très faible élancement.  
Programme SAFE**

Panagiotis Kotronis, J. Mazars, D. Chauvel, J. Dalbera, P. Pegon

► **To cite this version:**

Panagiotis Kotronis, J. Mazars, D. Chauvel, J. Dalbera, P. Pegon. 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, 1999, Cachan, France. pp.661-668. hal-01008448

**HAL Id: hal-01008448**

**<https://hal.science/hal-01008448>**

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.

**MODELE DE BETON ARME EQUIVALENT  
POUR L' ANALYSE DU COMPORTEMENT DES VOILES  
DE TRES FAIBLE ELANCEMENT  
PROGRAMME SAFE**

*EQUIVALENT REINFORCED CONCRETE MEDIUM MODEL  
FOR THE ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF  
LOW-RISE R/C SHEAR WALLS  
PROGRAM SAFE*

**Panagiotis KOTRONIS\***, **Jacky MAZARS\***,  
**Danielle CHAUVEL\*\***, **Jacques DALBERA\*\*\*** & **Pierre PEGON\*\*\*\***

**RESUME**

Le programme SAFE concerne des essais pseudodynamiques effectués à ISPRA sur des voiles en béton armé très faiblement élancés. La modélisation choisie au LMT pour calculer le comportement non linéaire des structures T5 et T12 du programme est ici présentée. Les maquettes sont modélisées selon le principe du «béton armé équivalent». Les maillages du béton et de l'acier sont découplés et des éléments barres ou poutres sont utilisés pour modéliser la structure. La loi constitutionnelle du béton est basée sur la mécanique de l'endommagement tandis que celle de l'acier suit une loi élastoplastique. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques prouve la capacité de la nouvelle méthode de simuler le comportement non linéaire des voiles de très faible élancement.

**Mots clés** : faible élancement, cisaillement, voiles SAFE.

**ABSTRACT**

Within the SAFE research project squat reinforced concrete walls have been tested pseudo-dynamically at ISPRA. This paper describes the modeling of the structures T5 and T12 of the program. Numerical calculations done by LMT are presented. Modeling is based upon "equivalent reinforced concrete medium" coupled with damage mechanics and plasticity. Beams and truss elements are used in order to elaborate an efficient, non time consuming simplified method. Comparison with experimental results demonstrate the efficiency of the modeling tools to understand the nonlinear behavior of very squat walls.

**Keywords** : low-rise walls, shear effects, walls SAFE.

---

\* Laboratoire de Mécanique et de Technologie (LMT), Cachan, France

\*\* EDF-SEPTEN, Lyon, France

\*\*\*COGEMA, Velizy, France

\*\*\*\* European Commission, Joint Research Centre, ELSA-TP480, Ispra, Italy

## 1. INTRODUCTION

Il existe aujourd'hui plusieurs codes d'éléments finis capables de donner des résultats fiables pour une grande variété de problèmes. Néanmoins, dans le cadre de la dynamique non linéaire le temps de calcul devient souvent très important surtout si on doit procéder à des études paramétriques. L'équipe « Modélisation des ouvrages en dynamique » 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. Le code EFICOS, produit de ces travaux, utilise des éléments barres et poutres de type Bernoulli ou Timoshenko ou Reissner divisées en couches et il a été utilisé avec succès pour des problèmes de murs d'élanement  $\geq 0.7$  (Mazars & Ghavamian. 1997, Mazars 1998).

Le programme de recherche expérimental SAFE effectué par COGEMA et EDF-SEPTEN concerne des essais de voiles en béton armé d'un élanement voisin de 0.4 soumis à des efforts dynamiques de cisaillement dus à un séisme (élanement faible – rotation en tête interdite). Plusieurs maquettes de différentes dimensions et quantités de ferrailage, ont été testées au Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne à ISPRA en Italie. Les premiers calculs de mur T5 ont montré que si on garde la même modélisation que celle pour les murs d'élanement  $\geq 0.7$  on aboutit à des résistances beaucoup plus grandes que la réalité (Figure 1).

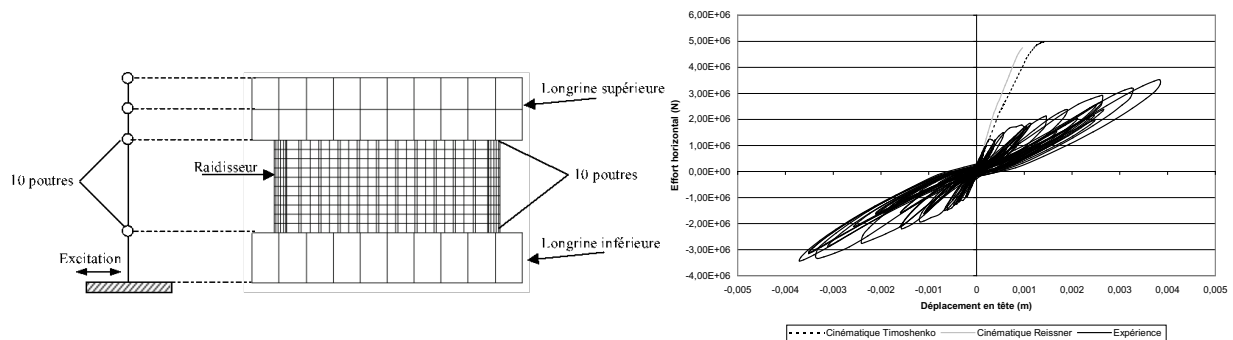


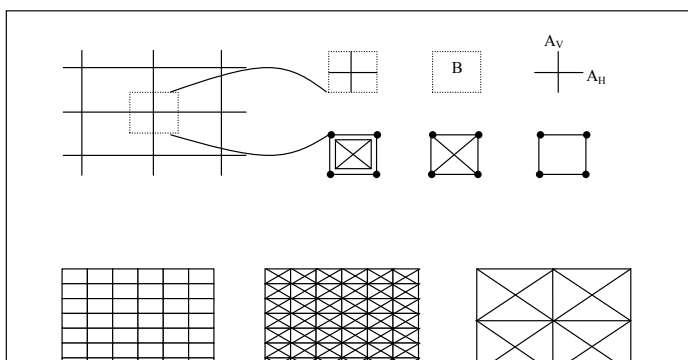
Figure 1 : Maquette T5 - Première modélisation et résultats par éléments poutres multicouches / T5 mock-up - First modelisation and results using multi-layered beam elements.

Il était donc impératif de trouver une nouvelle méthode - toujours basée sur une cinématique de barres et de poutres afin de préserver le caractère simplifié de notre approche – pour le comportement des murs de très faible élanement.

## 2. PRINCIPE DU BETON ARME EQUIVALENT

L'idée est de trouver le milieu équivalent *non linéaire* du matériau continu *composite* béton armé. Ce milieu équivalent est constitué par un assemblage de barres et de poutres qui représente le matériau composite continu (Fig. 2). Le pas suivant est de passer au niveau macro en trouvant le modèle capable de représenter l'ensemble de la structure. Le grand avantage de cette modélisation est que le modèle reste simple, les éléments utilisés sont familiers aux ingénieurs et le temps de calcul est modeste.

Plusieurs auteurs ont déjà travaillé sur l'utilisation des réseaux de barres et de poutres pour remplacer un corps élastique continu. Le premier était Hrennikoff (1941) qui propose plusieurs motifs géométriques de réseaux. Les propriétés élastiques des barres sont données par des équations proposées par l'auteur. Absi (1972) introduit la méthode des équivalences, et aboutit pratiquement aux mêmes résultats.



Van Mier (1998), inspiré par les travaux de Hermann et al. (1989), utilise les modèles lattice afin de reproduire les chemins réels de fracture. Enfin, parmi les méthodes utilisées pour le dimensionnement des structures en béton armé on remarque celles inspirées par la méthode de treillis (Ritter 1899, Mörsch 1920) et plus spécifiquement la théorie du champ

Milieu continu      Milieu équival. Béton + Acier

Discrétisation      Milieu équivalent      Modèle macro

Figure 2 : Principe du béton armé équivalent /  
Principle of reinforced concrete equivalent medium.

Afin de trouver le milieu équivalent non linéaire du matériau continu composite béton armé la procédure qu'on propose est la suivante :

- I. Déterminer l'angle  $\theta$  de la direction des axes principaux juste au moment de la première fissuration.
- II. Mailler le béton avec des éléments barres en utilisant le motif le plus simple proposé par Hrennikoff (1941). *L'angle  $\alpha$  que les diagonales forment avec les barres horizontales doit être, autant que faire se peut, proche de  $\theta$ .* Le nombre des éléments semble ne pas avoir d'influence sur le résultat (Kotronis et al. 1999) et le passage du milieu équivalent au modèle macro est donc immédiat.
- III. Utiliser pour le béton une loi de comportement non linéaire uniaxiale représentative des phénomènes majeurs dans un comportement cyclique.
- IV. Mailler l'acier en utilisant des barres horizontales et verticales en respectant les sections et la position des armatures dans la structure (la méthode de distribution peut aussi être utilisée). Utiliser pour décrire le comportement non linéaire de l'acier une loi élastoplastique avec écrouissage.
- V. Superposer les deux maillages et résoudre le problème avec un code des éléments finis.

### 3. APPLICATION AU CAS DES MAQUETTES SAFE

#### 3.1. Description des maquettes T5 et T12

Les murs, leurs raidisseurs ainsi que les longrines supérieure et inférieure assurant le chargement sont représentés à la Figure 3. Un dispositif de chargement a été conçu et construit de telle façon que la rotation de la longrine supérieure soit empêchée. Les maquettes sont encastrées à la base. Une masse de 29000 kg est considérée sur la dalle supérieure des maquettes. Le reste de la masse du voile et de l'acier est considéré négligeable par rapport à cette masse (Pegon et al. 1998a, 1998b).

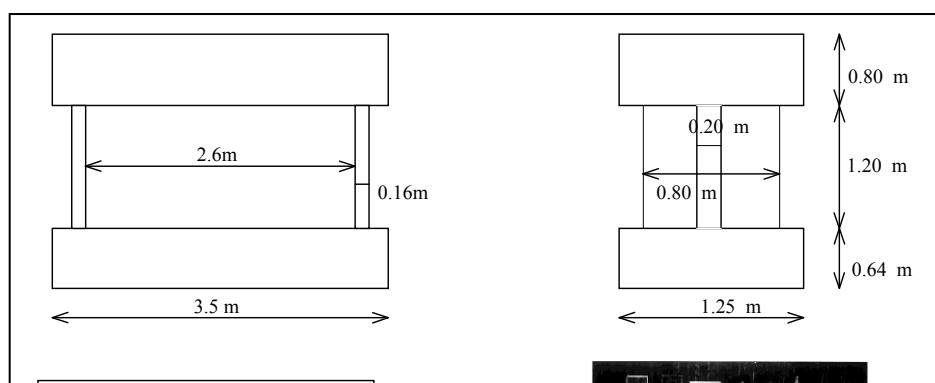


Figure 3 : Maquettes T5 et T12 / T5 and T12 mock-ups.

Par rapport à la structure T5, le mur T12 a beaucoup moins d'acier et une contrainte normale à la base plus importante (une charge verticale de 550 kN additionnelle est exercée).

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

#### 3.2.1. Calcul de l'angle $\theta$

Afin de calculer l'angle  $\theta$  de la direction des axes principaux juste au moment de la première fissuration on utilise les équations classiques de la mécanique des milieux continus ou à partir d'une analyse utilisant les cercles de Mohr. Dans l'étude qui suit l'effort de cisaillement au moment de la première fissuration, nécessaire pour calculer la contrainte de cisaillement, est lu sur la courbe expérimentale, mais ce résultat peut provenir d'un calcul préliminaire analytique (élastique) d'évaluation de cet état ou par éléments finis.

#### 3.2.2. Maillage béton

La dalle supérieure est modélisée par des poutres et les nervures par des poutres multicouches afin de représenter correctement leur flexion. La cinématique des poutres utilisées est de type Bernoulli. Le reste de la structure est modélisé par des éléments barres qui suivent le motif proposé par Hrennikoff. L'angle  $\alpha$  que les barres diagonales forment avec les barres horizontales est proche de l'angle  $\theta$  trouvé au pas précédent.

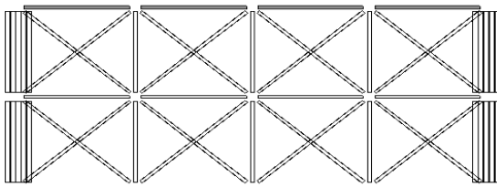


Figure 4 : Maillage béton T5 -  $\alpha = 41.1^\circ$ /  
Concrete mesh T5 -  $\alpha = 41.1^\circ$

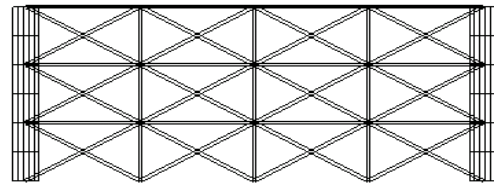


Figure 5 : Maillage béton T12 -  $\alpha = 30.1^\circ$ /  
Concrete mesh T12 -  $\alpha = 30.1^\circ$

#### 3.2.3. Maillage acier

Le ferrailage dans les nervures (éléments poutres multicouches) est modélisé par des couches dont le comportement est une combinaison de celui de béton et de l'acier à travers une loi d'homogénéisation

(Mazars et al 1999). Le reste de ferrailage est modélisé par des éléments barres dont la position et la section ont été trouvées avec la méthode des distributions.

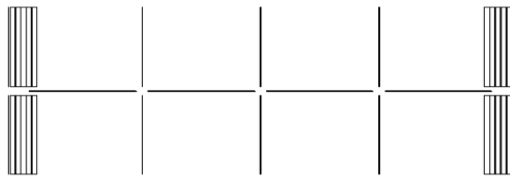


Figure 6 : Maillage acier T5 /  
Steel mesh T5.

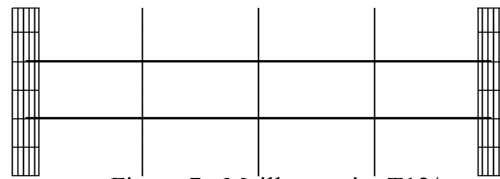
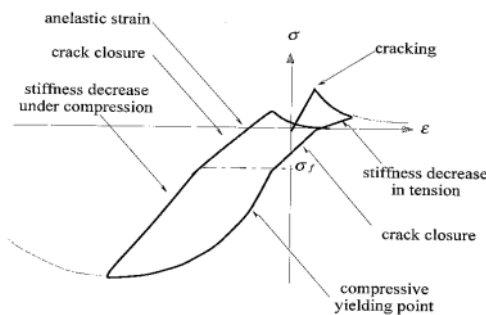


Figure 7 : Maillage acier T12/  
Steel mesh T12.

### 3.2.4. Lois de comportement

La loi utilisée pour le comportement du béton est basée sur la mécanique de l'endommagement et a été établie au LMT (La Borderie 1991). Elle peut prendre en compte la création, l'ouverture et la refermeture des fissures et est caractérisée par :



- Deux variables d'endommagement (qui tiennent en compte la traction et la compression).
- Déformations anélastiques couplées avec l'endommagement.
- Phénomènes unilatéraux. Ouverture et refermeture des fissures gérées par une fonction de rigidité.

Figure 8 : Loi uniaxiale pour le béton / UNIAxIAL concrete law.

Le comportement de l'acier est considéré élastique parfait.

### 3.2.5. Conditions limites

Le voile est encastré à la base, ainsi que les liaisons des poutres de la partie supérieure avec les nervures. Ces poutres sont très rigides et la rotation de leurs nœuds est bloquée. Le seul mouvement de la partie supérieure autorisé est donc le déplacement horizontal ou vertical.

### 3.2.6. Chargement

Les essais ont été réalisés sur le mur de réaction du Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne à ISPRA. La méthode pseudodynamique, utilisée pour ces essais, est une méthode numérique/expérimentale qui combine le calcul du déplacement de la structure (ici un degré de liberté de translation horizontale) et la mesure de la force employée pour imposer ce déplacement.

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 numérique d'un calcul dynamique (amortissement, intégration numérique). Cependant, des calculs dynamiques seront aussi nécessaires dans une 2<sup>ème</sup> étape pour qualifier la méthode dans son ensemble.

#### 4. RESULTATS DES CALCULS CYCLIQUES

Les figures suivantes représentent les déplacements horizontaux imposés en tête des maquettes et les efforts tranchants mesurés à la base.

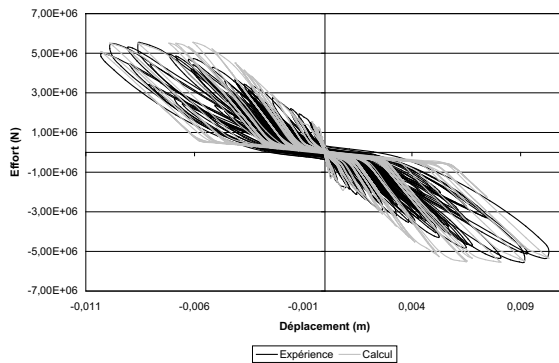


Figure 9 : T5 – Calcul cyclique/  
T5 – Cyclic calculations.

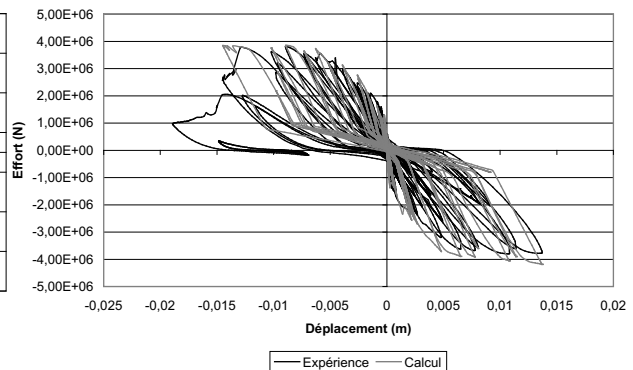


Figure 10 : T12 – Calcul cyclique/  
T12 – Cyclic calculations.

Les résultats suivent bien la courbe expérimentale et le temps de calcul reste tout à fait raisonnable. Il ne nous a fallu que cinq heures sur une station HP700 pour effectuer le calcul de la structure T5.

Néanmoins, les résultats numériques semblent surestimer le soulèvement des maquettes, soulèvement qui a été mesuré au cours des essais (Figure 11).

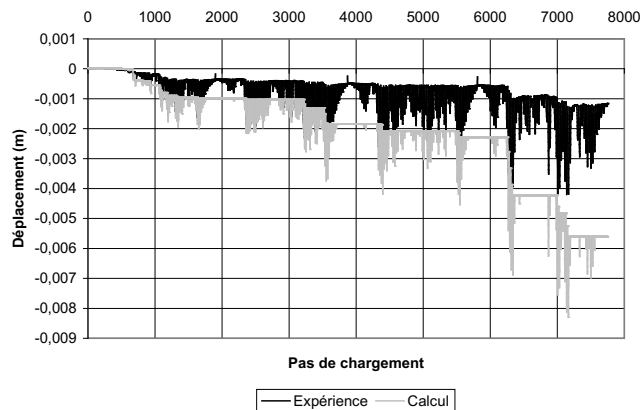


Figure 11 : T5 – Déplacement vertical/  
T5 – Vertical Displacement.

Une explication pourrait être le motif choisi pour la maille. En effet le motif proposé par Hrennikoff est valable pour un coefficient de Poisson égal à 0,33, ce qui n'est pas le cas du béton armé. L'utilisation d'autres motifs qui assurent l'indépendance de coefficient de Poisson pourrait être un remède à ce problème.

A la figure suivante la déformée de la maquette T12, au moment de plus grand déplacement, est tracée. On remarque que la rotation de la poutre supérieure est empêchée et que le mur est fortement cisailé. Les nervures néanmoins fléchissent, une flexion qui est correctement prise en compte grâce au grand nombre de poutres multicouches utilisées.

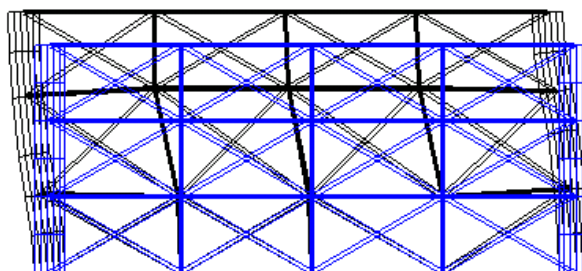


Figure 12 : T12 – Déformée/  
T12 – Deformed shape.

A la fin de l'essai T5 le béton de recouvrement était complètement « éclaté » et les aciers étaient visibles. Afin de voir l'influence de l'éclatement du béton un calcul complémentaire ne prenant pas en compte le béton d'enrobage a été réalisé (épaisseur du voile ramené à 15 cm au lieu de 20 cm). Les résultats obtenus sont de très bonne qualité (Figure 13).

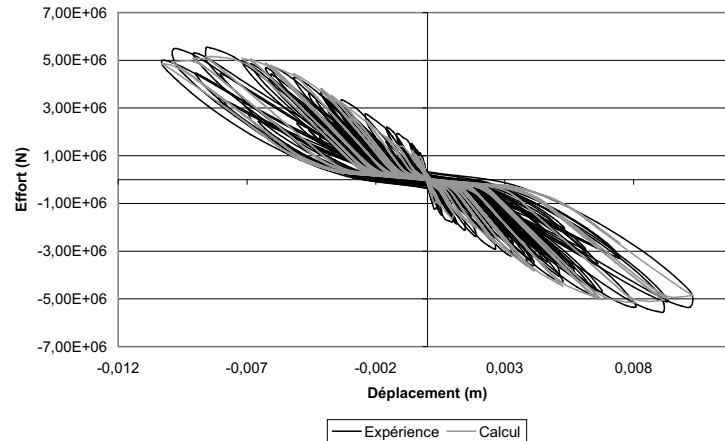


Figure 13 : T5 – Prise en compte de l'éclatement/  
T5 – Taking into account the spalling.

## 5. CONCLUSIONS

Une nouvelle méthode de calcul capable de simuler le comportement non linéaire des voiles de très faible élancement (voisin de 0.4) est ici présentée. Basée sur les motifs proposés par Hrennikoff (1941) 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 qui sont fortement cisailées. Le coût en temps est tout à fait raisonnable ce qui permet d'effectuer des calculs paramétriques.

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 aussi la possibilité de bien représenter la flexion exercée sur les raidisseurs des maquettes.

L'importance de l'angle  $\alpha$  que les barres diagonales forment avec les barres horizontales a été démontrée, ainsi que sa relation avec l'angle  $\theta$  des axes principaux au moment juste avant la fissuration.

La méthode semble surestimer l'expansion verticale des maquettes et cela est probablement dû au motif utilisé. Le choix d'un motif plus élaboré, indépendant de coefficient de Poisson pourrait constituer une solution au problème.



On a enfin montré l'importance du phénomène de l'éclatement du béton pour la bonne modélisation du comportement de la maquette T5.

Plusieurs questions supplémentaires comme l'influence du nombre des barres, la sensibilité des résultats à l'angle  $\alpha$ , la capacité de la méthode de prévoir la capacité ultime, l'optimisation de temps de calcul, la représentation des résultats locaux ont été analysées dans Kotronis et al. (1999).

Dans le futur on traitera des calculs dynamiques, pour valider la méthode dans son ensemble, le choix des motifs plus élaborés, l'étude de leur influence sur les résultats locaux.

## REFERENCES

- Absi, E. 1972. La théorie des équivalences et son application à l'étude des ouvrages d'art. *Annales de I.T.B.T.P.*, n° 295 Octobre 1972
- Collins, M.P. 1978. Toward a rational theory for RC members in shear. *J. Struct. Div., ASCE*, 104(4),649-666.
- Hermann, H.J. & Hansen, H. & Roux, S. 1989. Fracture of disordered elastic lattices in two dimensions, *Phys.Rev.B*, 39, 637-648.
- Hrennikoff, A. 1941. Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method, *J.Appl.Mech.*, A169-A175
- Hsu, T. T. C. 1988. Softening Truss Model Theory for Shear and Torsion. *ACI Structural Journal*, V.85, No. 6, Nov-Dec. 1988, pp. 624-635.
- Kotronis, P. & Davenne, L. & Mazars, J. 1999. Modélisation du comportement dynamique de murs à très faible élanement. *Rapport interne 223*, LMT-Cachan
- 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. & Ghavamian, S. 1997. Analyse non-linéaire du comportement sur table sismique d'un voile B.A. à faible élanement 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. 1998. French advanced research on structural walls - An overview on recent seismic programs. *Proc. 11<sup>th</sup> European Conf. on Earthquake Engineering Paris*, edit. Ph. Bisch et al. Balkema Rotterdam.
- Mazars, J. & Kotronis P. & Ghavamian, Sh. 1999. Stratégie de modélisation de type poutre pour une large variété de problèmes sismiques. *V<sup>ème</sup> Colloque National, Génie Parasismique et réponse dynamique des ouvrages. AFPS'99*.
- Mörsch, E. 1920. Der Eisenbetonbau-Seine Theorie und Anwendung (Reinforced concrete construction – Theory and application). 5<sup>th</sup> Ed., Wittwer, Stuttgart, Vol.1, Part 1.
- Pegon, P. & Magonette, G. & Molina, F.J. & Verzeletti, G. & Dyngeland, T. & Negro, P. & Tirelli, D. & Tognoli, P. 1998a. *Programme SAFE :Rapport du TEST T5, JRC*.
- Pegon, P. & Magonette, G. & Molina, F.J. & Verzeletti, G. & Dyngeland, T. & Negro, P. & Tirelli, D. & Tognoli, P. 1998b. *Programme SAFE :Rapport du TEST T12, JRC*.
- Ritter, W. 1899. Die bauweise hennebique. *Schweizerische Bauzeitung*, 33(7), 59-61.
- Van Mier, J.G.M 1998. Lattice type models for fracture : Methodology and future prospects. *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3 AEDIFICATIO Publishers*, D-79104 Freiburg, Germany, volume 2 pp 887-900.