

## DISPOSITION OPTIMALE DU FERRAILLAGE DANS LES VOILES EN BETON ARME

**D. BESSAD<sup>1</sup>, A. NEKMOUCHE<sup>2</sup>, N. KHELLIL<sup>3</sup>, S. BOUKAIS<sup>4</sup>, O. BELAIDI<sup>5</sup>... (12 gras)**

1. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Laboratoire (LaMoMS), [dbessad@yahoo.fr](mailto:dbessad@yahoo.fr)
2. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Laboratoire (LaMoMS), [aminenekmouche@yahoo.com](mailto:aminenekmouche@yahoo.com)
3. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Laboratoire (LaMoMS), [nacimusmaximus@gmail.com](mailto:nacimusmaximus@gmail.com)
4. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Laboratoire (LaMoMS), [sbouka58@yahoo.fr](mailto:sbouka58@yahoo.fr)
5. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Laboratoire (LaMoMS), [bel\\_ouar@yahoo.fr](mailto:bel_ouar@yahoo.fr)

### Résumé

L'objectif de ce travail est de proposer une approche liée à la disposition du ferrailage pour remédier aux désordres occasionnés aux voiles, dont l'élancement géométrique est compris entre 1 et 2, lors de séismes importants. Ce type de voile est nommément appelé voile de transition [1]. Le constat fait après le séisme de Boumerdes (2003) [2] est alarmant ; la majorité des voiles courts ont subi des fissures en croix, qu'on peut éventuellement considérer suivant les diagonales de ces éléments. Le ferrailage conventionnel ne répond pas totalement à la sollicitation. Il est nécessaire de disposer les armatures suivant une direction orientée pour fermer ces fissures ou tout simplement d'en empêcher leur apparition. La recherche d'un angle optimal relatif à la disposition du ferrailage s'impose dans le cadre de cette investigation. La performance mécanique de l'élément de structure est représentée en termes de capacité ultime et d'évaluation des dommages.

Une approche locale est utilisée en modélisant des voiles en béton armé en 3-D sollicités sous chargement horizontal. Le modèle numérique utilisé pour la modélisation du béton est le modèle elasto-plastique endommageable d'ABAQUS qui permet de visualiser les dommages au niveau local et de déterminer le mode de rupture. Par contre, pour les aciers un modèle elasto-plastique à écrouissage isotrope est utilisé.

**Mots clefs :** *simulation, voiles en béton armé, ferrailage diagonal, angle d'inclinaison.*

### 1. Introduction :

Le travail est basé sur la simulation numérique de cinq (05) voiles en béton armé à l'aide du code de calcul commercial de type éléments finis, ABAQUS [3]. Les travaux expérimentaux de Maier en 1985 [4] sont choisis comme soutien de base à cette recherche. Un premier voile consistant à valider les résultats expérimentaux est modélisé avec les mêmes caractéristiques géométriques

et mécaniques que le modèle de Meir, son ferrailage est donc conventionnel (modèle FC). Les quatre autres voiles présentent des configurations de ferrailage différentes, une disposition orientée des armatures suivant un angle  $\alpha$  ( $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$  et  $75^\circ$ ) illustrée sur la (figure 2), est adoptée. Ces modèles FR $\alpha$  permettent de rechercher une position préférentielle pour une reprise efficace des efforts appliqués [5]. Ces voiles sont testés sous chargement horizontale d'amplitude croissante. La simulation proposée permet de rendre compte des différents phénomènes locaux et globaux intervenant lors d'un chargement, ceci grâce à la pertinence des lois de comportements utilisées.

### 2. Simulation Numérique

#### 2.1 Modèles simulés

Le voile de Maier 1985 [4] est choisi comme modèle de référence (modèle FC), caractérisé par un ferrailage conventionnel (quadrillage de barres verticales et horizontales). Le ferrailage et les dimensions sont représentés sur la Figure 1.

L'étude est portée sur quatre voiles (modèle FR $\alpha$ ) différents par la disposition des armatures suivant une direction inclinée d'un angle  $\alpha$  ( $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ ) par rapport à l'horizontal (figure 2).

La quantité d'armature utilisée (en terme de poids) étant gardée constante pour les cinq (05) modèles considérés.

#### 2.2 Modèle élément fini :

Des éléments linéaires solides HEX8 (éléments d'ABAQUS, composés de huit nœuds, ayant chacun six degrés de liberté (trois translations et trois rotations) avec une formulation lagrangienne (C3D8), sont utilisés pour le maillage du béton. La dimension d'un élément solide est de 1.5cm dans les trois directions de l'espace au niveau de l'âme du voile, offrant un maillage extrêmement fin. Les barres d'aciers sont maillées avec des éléments barres 3D qui travaillent en traction compression avec une loi de comportement uni-axiale (élément d'ABAQUS), composé de deux nœuds, ayant chacun six degrés de liberté). L'interaction entre les

éléments d'aciers et ceux du béton est assurée par la fonction EMBEDDED ELEMENT d'ABAQUS (cette dernière considère un contact parfait entre les deux matériaux). Les conditions aux limites et le point d'application du chargement sont illustrés à la (Figure 3)

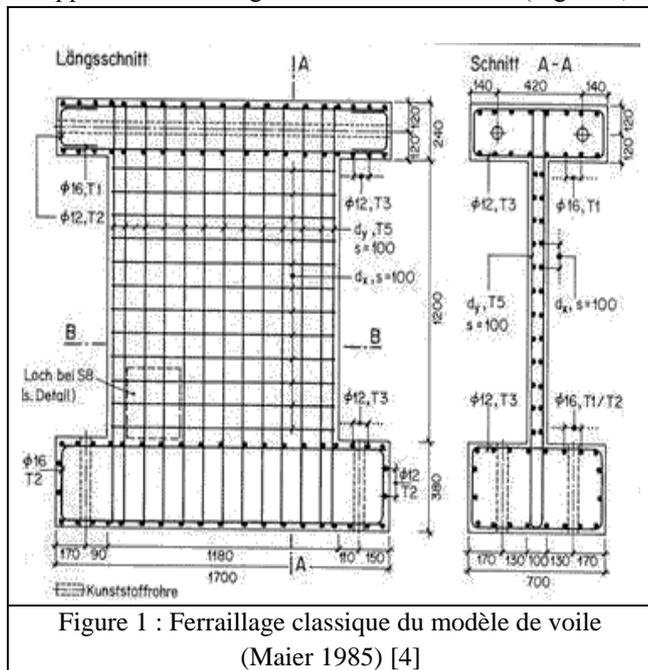


Figure 1 : Ferrailage classique du modèle de voile (Maier 1985) [4]

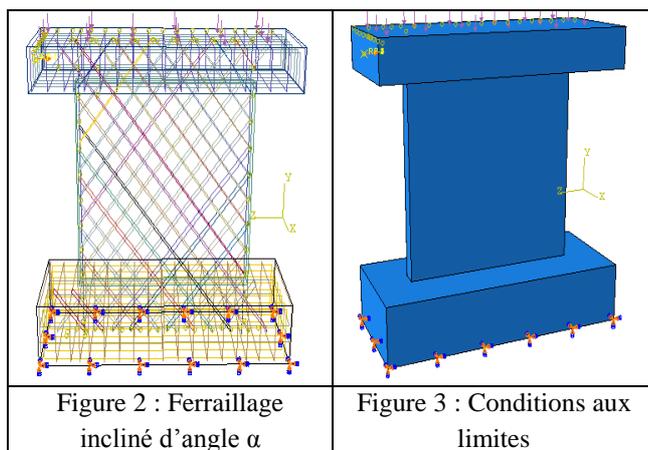


Figure 2 : Ferrailage incliné d'angle  $\alpha$

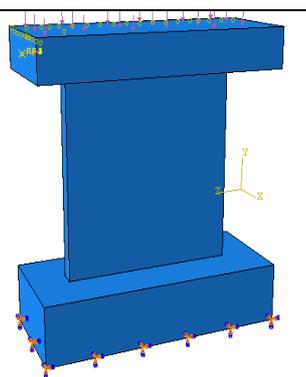


Figure 3 : Conditions aux limites

## 2.3 Matériaux utilisés :

### Acier

Un modèle simplifié est utilisé pour modéliser le comportement des armatures. Un comportement élasto-plastique à écrouissage isotrope est adopté dans cette étude.  $E = 210\text{GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\sigma_y = 574\text{ Mpa}$ ,  $\sigma_u = 764\text{ Mpa}$

### Béton

Le modèle concrete damaged plasticity (CDP) implémenté dans le code de calcul ABAQUS est utilisé, ce dernier est basé sur un couplage de plasticité (représentation des déformations irréversibles) et d'endommagement (représentation des fissures). Il

suppose que les deux principaux mécanismes de rupture soient la fissuration ou bien l'écrasement du béton en compression [1]. Les paramètres du modèle sont résumés dans le tableau suivant :

PROPRIETES	VALEURS
<b>CHARGEMENT UNI-AXIAL</b>	
$f_c$ Résistance à la compression (Mpa)	<b>32</b>
$f_{c0}$ Contrainte élastique en compression (Mpa)	<b>9.6</b>
$f_{t0}$ Contrainte élastique en traction (Mpa)	<b>2.52</b>
$E_c$ Module de Young (Mpa)	<b>36600</b>
<b>CHARGEMENT MULTI-AXIAL</b>	
Coeffession de poisson	<b>0.18</b>
Angle de dilatation	<b>56.3</b>
$\alpha_f$ rapport entre la contrainte uni-axial et bi-axial	<b>1.16</b>

Tableau 1 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton (CDP)

## 3. Résultats et discussion

### 3.1 Validation du modèle

Pour valider l'expérimental il faut superposer la courbe donnée par l'expérimental avec celle donnée par la simulation numérique, la figure ci-dessous montre la superposition des deux courbes :

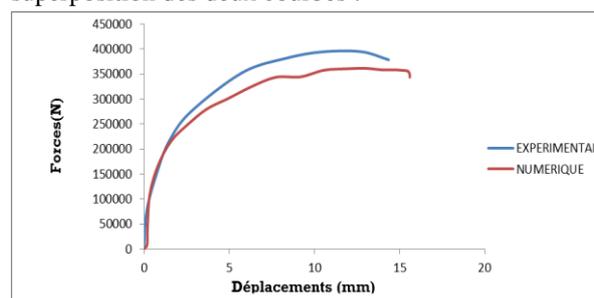


Figure 4 : Superposition des courbes force-déplacement des modèles expérimental (Maier) et simulé (FC).

On distingue dans « la Courbe de capacité du modèle FC » deux phases de la réponse du voile :

La 1<sup>ère</sup> phase : le voile a un comportement élastique (rigidité initiale) jusqu'à un déplacement égal à 2 [mm] correspondant à une capacité portante de 230 [KN]. Dans cette phase le modèle numérique reproduit fidèlement le comportement expérimental du voile, en effet, nous remarquons que les deux courbes expérimentale et numérique sont confondues.

La 2<sup>ème</sup> phase : au-delà du déplacement de 2 [mm], le voile a un comportement élasto-plastique et perd sa rigidité initiale. Le modèle FC atteint une capacité ultime maximale égale à 361.439[KN] correspondant au déplacement maximal de 15.61 [mm]. Durant cette phase le modèle numérique sous-estime le comportement expérimental. En effet, nous remarquons qu'à partir d'environ (230KN ; 2mm), le modèle présente une pente moins importante comparée à la courbe expérimentale,

menant à une sous-estimation en fin de test i.e. à la partie adoucissante pré-rupture d'environ 8,43%.

### 3.2 Comparaison entre les différentes dispositions du ferrailage

#### A. En termes de courbes de forces-déplacements

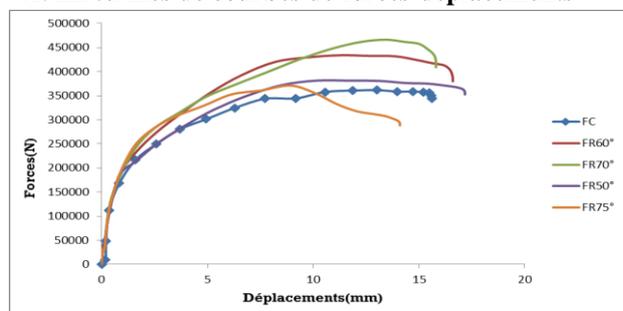


Figure 5 : Superposition des courbes forces-déplacements des modèles FC et FR $\alpha$

On constate à partir des courbes de superposition (figure 5), une amélioration de la capacité mécanique des modèles FR $\alpha$  par rapport au modèle de référence FC. En effet, nous avons relevé une amélioration, variant de 2.63% (modèle FR75°) à 28.96% (modèle FR70°). Ces résultats, montrent l'influence significative d'un ferrailage disposé suivant une direction optimale de 70° sur le comportement global du voile de transition pour le cas d'étude présent.

#### B. En termes de dommages en traction

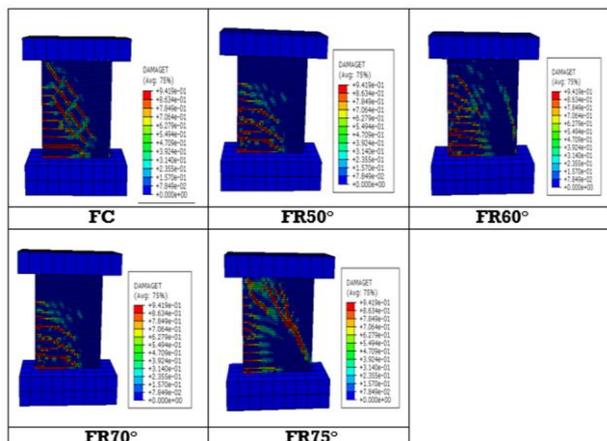


Figure 6 : Représentation des dommages dus à la traction

La figure 6 illustre un endommagement prononcé pour le modèle classique FC, caractérisé par une large répartition de fissures horizontales (flexion) et diagonales (cisaillement) dans l'âme du voile. Le modèle FR75° est le plus endommagé corroborant son comportement déjà remarqué sur la figure 5. Ce résultat confirme que l'orientation des armatures est prépondérante pour une performance adéquate de l'élément de structure qui est le voile. On note que les dommages suivant la diagonale

(fissure de cisaillement) du modèle FR70° ont disparu, confirmant la position optimale du ferrailage pour ce voile considéré.

### Conclusion

L'analyse des résultats montre que la performance mécanique des voiles de transition peut être améliorée significativement, en adoptant une stratégie d'orientation des armatures telles qu'elles puissent reprendre efficacement les efforts appliqués. Cette approche se révèle comme innovante de par le fait que la capacité ultime du voile se trouve augmentée sans variation de la quantité d'armatures. La performance mécanique s'est améliorée de plus de 28% en ayant gardé la même quantité de matériaux utilisée dans le modèle expérimental.

La comparaison des cinq modèles sous ferrailage diagonal montre que spécimen RF70° est le plus performant en termes de résistance ainsi qu'en termes de dommages.

Ceci implique que 70° est la direction la plus proche des contraintes principales développées pour le modèle choisi dans ce travail.

### Références

- [1] A. Kezmane1, S .Boukais1, M. Hamizi .Nouvelle technique de ferrailage des voiles courts suivant les contraintes principales développées. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012, France.
- [2] Victor Davidovici. «Séisme de BOUMERDES - 21mai 2003». Rapport préliminaire, Ministère de l'Habitat, REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE., 8 juin 2003.
- [3] ABAQUS : Theory Manual (Version 6.10)
- [4] Maier, J., Thurlimann, B., 1985, Bruchversuchen an stahlbetonscheiben institute für baustatik und konstruktion. Eid genossische, technishehochschule (ETH) zurich, suisse, 130pp.
- [5] Kezmane A, Hamizi M. Boukais S., Hannachi N.E., Numerical simulation of RC shear wall strengthened by external bonding of a composite material. 15th International Conference on Experimental Mechanics ICEM15. Porto (Portugal) 22-27 July 2012.