HAL
open science

Élément poutre multifibre avec gauchissement pour la modélisation non linéaire des structures en béton armé

S Capdevielle, S. Grange, F Dufour, C. Desprez

To cite this version:

S Capdevielle, S. Grange, F Dufour, C. Desprez. Élément poutre multifibre avec gauchissement pour la modélisation non linéaire des structures en béton armé. CSMA 2019, 14ème Colloque National en Calcul des Structures, May 2019, Presqu'île de Giens, France. hal-02511856

HAL Id: hal-02511856

https://hal.science/hal-02511856v1

Submitted on 19 Mar 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.

CSMA 2019
14ème Colloque National en Calcul des Structures
13-17 Mai 2019, Presqu'île de Giens (Var)

Élément poutre multifibre avec gauchissement pour la modélisation non linéaire des structures en béton armé

S. Capdevielle[1], S. Grange[2], F. Dufour[3],
C. Desprez[4]

[1] *LMT, ENS Paris-Saclay, CNRS, Université Paris-Saclay, F-94235 Cachan, sophie.capdevielle@ens-paris-saclay.fr*
[2] *Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621 Villeurbanne, stephane.grange@insa-lyon.fr*
[3] *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000 Grenoble, frederic.dufour@3sr-grenoble.fr*
[4] *Université Paris-Est, MAST, SDOA, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, cedric.desprez@ifsttar.fr*

Résumé — L'objet des travaux présentés ici est d'améliorer la méthode de modélisation par éléments finis multifibres en créant un nouvel élément à cinématique enrichie, permettant de tenir compte du gauchissement des sections transversales dû au cisaillement. Les degrés de liberté de gauchissement sont calculés simultanément aux degrés de liberté de type poutre, de manière implicite, permettant un couplage entre l'évolution du gauchissement et celle de l'endommagement du matériau. Plusieurs cas-tests sont présentés, mettant en évidence l'intérêt de la prise en compte du gauchissement.
Mots clés — poutre multifibre, gauchissement, cisaillement, endommagement, analyse non linéaire.

1 Introduction

L'étude de la vulnérabilité des structures existantes sous séisme requiert l'utilisation de méthodes numériques efficaces. Alors que le dimensionnement au séisme de structures neuves peut s'appuyer sur des hypothèses de fonctionnement (rotules plastiques, éléments fusibles) permettant d'utiliser des méthodes d'analyse simplifiées, la vérification des structures existantes nécessite des méthodes d'analyse plus sophistiquées basées sur le calcul non linéaire du comportement à l'échelle de la structure. En réponse à ce besoin, la modélisation par éléments finis multifibres allie la rapidité de calcul et l'ergonomie des éléments poutres avec la possibilité d'obtenir des informations précises sur le comportement local de la structure, grâce à l'ajout d'une échelle aux éléments poutres classiques. La figure 1 schématise le principe des éléments finis multifibres. Les déformations dans la section $\boldsymbol{\epsilon}$ sont calculées à partir des déformations généralisées $\mathbf{e}_s$ par une hypothèse cinématique, en général basée sur la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli ou de Timoshenko. Les contraintes $\boldsymbol{\sigma}$ sont calculées en chaque point d'intégration de la section grâce à une loi de comportement préalablement définie, et qui peut être différente en chaque point si la section se compose de matériaux différents. Les efforts généralisés $\mathbf{P}_s$ sont ainsi calculés par intégration des contraintes sur la section [16]. Répondant au besoin de simulations à coût de calcul réduit, la méthode de modélisation par éléments finis multifibres permet d'obtenir de bons résultats pour des éléments structuraux élancés sollicités en flexion [8, 10]. Toutefois, lorsque les sollicitations de cisaillement deviennent prédominantes, la méthode de modélisation par éléments poutres multifibres ne permet plus d'obtenir de résultats satisfaisants [12].

Pour élargir le champ d'application de la méthode, plusieurs auteurs ont proposé d'enrichir l'hypothèse cinématique à la base du calcul des déformations dans la section, pour tenir compte du gauchissement sous l'effet du cisaillement. Ainsi, [7] a proposé d'enrichir un élément poutre 2D multicouche par un profil de gauchissement dû au cisaillement transversal, calculé par la satisfaction de l'équilibre élastique local inter-fibres. Le profil de déformations obtenu est ensuite gardé constant au cours du calcul, seule l'amplitude du gauchissement varie avec l'intensité de la sollicitation, ce qui ne permet pas de prendre en compte l'endommagement du béton dans les changements de rigidité et donc de la forme de la section gauchie. Sur le même principe, [15] ont développé un modèle de gauchissement de torsion, conservé fixe au cours du calcul. Ce modèle a servi de socle pour construire un modèle d'élément multifibre enrichi par le gauchissement de torsion, où les déformations de gauchissement sont couplées à l'endommagement du matériau au cours d'un calcul multifibre [3]. Pour tenir compte du gauchissement

sous l'effet couplé de la torsion et de l'effort tranchant, les modèles de [1] et de [11] permettent la détermination intrinsèque du gauchissement lors du calcul de structure, de manière simultanée au calcul des déplacements et rotations aux noeuds des éléments poutres.

En prenant appui sur ces modèles, la présente contribution propose un modèle de gauchissement sous cisaillement transversal et torsion, couplé à l'endommagement du matériau béton. Le principe de l'enrichissement et de la résolution est présenté dans un premier temps, suivi par la validation de la formulation à l'échelle de la section. Les résultats de tests numériques et expérimentaux à l'échelle de la structure sont enfin présentés, afin d'analyser l'impact de l'enrichissement sur la représentation du comportement de la structure.

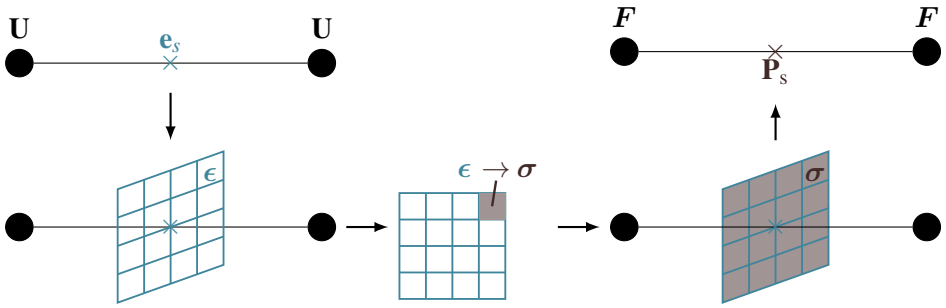


FIGURE 1 – Principe des éléments poutres multifibres

2 Enrichissement des éléments poutres mutlifibres

2.1 Enrichissement de la cinématique

Le gauchissement de la section est pris en compte par un enrichissement de la cinématique, équation (1). À partir des déplacements $\mathbf{u}^p$ dans une poutre de Timoshenko, dont la section reste plane, un déplacement $\mathbf{u}^w$ de gauchissement est ajouté dans la direction longitudinale x de la poutre. Ce déplacement peut varier dans les directions transversales de la section y et z, mais aussi dans la direction longitudinale de la poutre, ce qui permet de tenir compte de la variation de l'intensité de chargement le long de la poutre et de l'effet de conditions aux limites de gauchissement bloqué.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^p + \mathbf{u}^w = \begin{bmatrix} u - y\theta_z + z\theta_y \\ v - z\theta_x \\ w + y\theta_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_x^w(x,y,z) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

À partir de cette cinématique enrichie, le tenseur des déformations linéarisé est donné par l'équation (2). En notant $\boldsymbol{\sigma}$ le tenseur des contraintes, obtenu à partir des déformations par une loi de comportement non linéaire $\boldsymbol{\sigma} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}\left(\varepsilon^p, \varepsilon^w\right)$, l'équilibre de la poutre en l'absence d'efforts volumiques est donné par l'équation (3).

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\left(\mathbf{grad}(\mathbf{u}) + \mathbf{grad}(\mathbf{u})^T\right) = \varepsilon^p + \varepsilon^w \tag{2}$$

$$\mathrm{div}\left(\boldsymbol{\sigma}\right) = 0 \tag{3}$$

2.2 Formulation variationnelle des équations d'équilibre

La formulation variationnelle de l'équation d'équilibre s'écrit :

$$\int_\Omega \left(\delta\mathbf{u}^{pT} + \delta\mathbf{u}^{wT}\right) \mathrm{div}\left(\boldsymbol{\sigma}\right) d\Omega = 0 \tag{4}$$

$\delta\mathbf{u}^p$ et $\delta\mathbf{u}^w$ représentent les champs virtuels associés aux déplacements de la section plane et de gauchissement respectivement. Sous l'hypothèse d'orthogonalité de $\mathbf{u}^p$ et $\mathbf{u}^w$, l'équation (4) est projetée

sur l'espace des déplacements virtuels de la section plane (équation (5)), et des déplacements virtuels de gauchissement (équation (6)). Cette hypothèse d'orthogonalité signifie que le champ de déplacements de gauchissement doit être indépendant de celui de la section plane, au sens où le gauchissement ne doit pas pouvoir produire de mouvement de corps rigide de la section. La conséquence de cette hypothèse d'orthogonalité sur la formulation est approfondie en section 2.4.

$$\int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^{pT} \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma})\, d\Omega = 0 \tag{5}$$

$$\int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^{wT} \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma})\, d\Omega = 0 \tag{6}$$

L'équation (5) représente l'équilibre global de la poutre. Le développement de cette équation mènerait aux équations d'équilibre classiques globales de la poutre [1]. L'équation (6) représente l'équilibre local au sein de la poutre, non vérifié habituellement. Après intégration par partie des équations (5) et (6), on obtient la formulation variationnelle des équations d'équilibre, donnée par les équations (7) et (8). Le second membre de l'équation (8) représente les efforts générés par un champ de gauchissement gêné. Si la poutre est libre de gauchir, l'équation (8) devient $\int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\epsilon}^{wT} \boldsymbol{\sigma}\, d\Omega = 0$.

$$\int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\epsilon}^{pT} \boldsymbol{\sigma}\, d\Omega = \int_{\partial\Omega} \delta \mathbf{u}^{pT} (\boldsymbol{\sigma}\mathbf{n})\, dS \tag{7}$$

$$\int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\epsilon}^{wT} \boldsymbol{\sigma}\, d\Omega = \int_{\partial\Omega} \delta \mathbf{u}^{wT}_{x} (\sigma_{xx} n_x)\, dS \tag{8}$$

2.3 Discrétisation et méthode de résolution

Les degrés de liberté du problème sont les déplacements et rotations classiques de l'élément poutre, contenus dans un vecteur $\mathbf{U}^p_{el}$, ainsi que les degrés de liberté additionnels de gauchissement, interpolés aux noeuds des éléments poutres et rangés dans un vecteur $\mathbf{U}^w_{el}$. Avec $\boldsymbol{B}_p$ et $\boldsymbol{B}_w$ les matrices regroupant les dérivées des fonctions de forme associées à la discrétisation spatiale longitudinale, et $\mathbf{a}_s$ et $\mathbf{a}_w$ les matrices contenant l'interpolation des degrés de liberté dans la section, la part des déformations provenant des déplacements de la section plane $\boldsymbol{\epsilon}^p$ et celle provenant du gauchissement $\boldsymbol{\epsilon}^w$ sont alors données par l'équation (9). Pour plus d'information sur le contenu précis des matrices citées, le lecteur est invité à se référer à [2].

$$\boldsymbol{\epsilon}^p = \mathbf{a}_s \boldsymbol{B}_p \mathbf{U}^p_{el}\ , \quad \boldsymbol{\epsilon}^w = \mathbf{a}_w \boldsymbol{B}_w \mathbf{U}^w_{el} \tag{9}$$

La formulation variationnelle du problème construite au paragraphe précédent permet d'obtenir les équations à résoudre pour calculer $\mathbf{U}^p_{el}$ et $\mathbf{U}^w_{el}$. Après discrétisation des équations (7) et (8), on obtient la forme discrète du problème complet non linéaire à résoudre, par assemblage sur les n_{el} éléments multifibres enrichis de la structure (équation (10)). $\boldsymbol{F}_{\mathrm{ext}}$ représente le vecteur des efforts imposés aux nœuds des éléments poutres, et $\boldsymbol{F}^w$ correspond au vecteur des efforts générés par la restriction du gauchissement. Ces équations d'équilibre discrétisées sont ensuite résolues par un schéma implicite, basé sur une méthode de Newton Raphson.

$$\mathop{\mathbf{A}}_{e=1}^{n_{el}} \begin{bmatrix} \int_{\Omega^e} \boldsymbol{B}_p^T \mathbf{a}_s{}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}\left(\boldsymbol{\epsilon}^p, \boldsymbol{\epsilon}^w\right)\ d\Omega^e \\ \int_{\Omega^e} \boldsymbol{B}_w^T \mathbf{a}_w{}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}\left(\boldsymbol{\epsilon}^p, \boldsymbol{\epsilon}^w\right)\ d\Omega^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{\mathrm{ext}} \\ \boldsymbol{F}^w \end{bmatrix} \tag{10}$$

2.4 Projection des fonctions de forme sur la section

Pour assurer l'orthogonalité du champ de déplacement de gauchissement à celui de la section plane, les mouvements de corps rigide doivent être ôtés des possibilités de solution pour $\mathbf{u}^w$. Pour cela, les fonctions de forme pour l'interpolation du gauchissement sur la section $\boldsymbol{N}_i(y,z)$ sont projetées sur l'espace orthogonal aux déplacements de corps rigide de la section plane. La matrice $\mathbf{a}_w$ contient alors les fonctions de forme obtenues après projection, notées $\tilde{\boldsymbol{N}}_i$, et leurs dérivées. La méthode de calcul présentée ici

s'appuie sur celle définie par [11], mais propose un calcul des dérivées des fonctions de forme projetées différent, afin de libérer $\mathbf{u}^w$ des mouvements de corps rigide pour une discrétisation quelconque de la section.

$\mathbf{u}^w$ ne possède qu'une composante selon x, comme indiqué dans l'équation (1). Or, la composante axiale du champ de déplacement de Timoshenko $\mathbf{u}^p{}_x$ est générée par les fonctions de base 1, y et z. La projection des fonctions de forme dans l'espace orthogonal au champ de déplacement $\mathbf{u}^p{}_x$ est alors donnée par l'équation (11), et les dérivées des fonctions de forme projetées par l'équation (12). Les constantes a_1, a_2 et a_3 sont calculées par intégration numérique sur la section. La précision de leur calcul conditionne l'efficacité de la projection, et nécessite un nombre de points d'intégration suffisant dans la section.

$$\tilde{\boldsymbol{N}}_i = \boldsymbol{N}_i - \int_{\mathcal{S}} \boldsymbol{N}_i \begin{bmatrix} \frac{1}{a_1} & \frac{y}{a_2} & \frac{z}{a_3} \end{bmatrix} d\mathcal{S} \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad a_1 = \int_{\mathcal{S}} 1\, d\mathcal{S}\ ; \quad a_2 = \int_{\mathcal{S}} y^2\, d\mathcal{S}\ ; \quad a_3 = \int_{\mathcal{S}} z^2\, d\mathcal{S} \tag{11}$$

$$\frac{\partial \tilde{\boldsymbol{N}}_i}{\partial y} = \frac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial y} - \int_{\mathcal{S}} \boldsymbol{N}_i \frac{y}{a_2} d\mathcal{S} \qquad \text{et} \qquad \frac{\partial \tilde{\boldsymbol{N}}_i}{\partial z} = \frac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial z} - \int_{\mathcal{S}} \boldsymbol{N}_i \frac{z}{a_3} d\mathcal{S} \tag{12}$$

En pratique, l'enrichissement présenté ici est implémenté sous la plateforme de calcul **ATLAS** [9], dans un élément poutre de Timoshenko linéaire, sous intégré pour éviter les blocages en cisaillement. La section est discrétisée en éléments triangulaires quadratiques, car les 3 points d'intégration par élément sont nécessaires pour le calcul exact des fonctions de forme projetées. Les calculs présentés dans les parties 3 et 4 sont réalisés avec cet élément.

3 Validation à l'échelle de la section

La formulation de l'enrichissement ayant été établie, cette partie présente le test de l'élément multifibre enrichi en élasticité linéaire sous sollicitation d'effort tranchant. Une poutre console de section rectangulaire homogène est soumise à un effort vertical à son extrémité libre (figure 2). L'expression analytique des déformations de cisaillement ε_{xz}, provenant de la formule de Jourawski, est donnée par l'équation (13). On note h la hauteur de la section et I_y son moment quadratique. V_z représente l'effort tranchant et G le module de cisaillement du matériau.

$$\varepsilon_{xz}(x,z) = \frac{V_z}{2GI_y}\left((h/2)^2 - z^2\right) \tag{13}$$

Le calcul numérique est effectué avec une poutre de longueur $L = 1\,\mathrm{m}$, sollicitée par un effort $\mathrm{F} = -1\,\mathrm{N}$ dans la direction z, et discrétisée en 10 éléments multifibres enrichis du gauchissement couplé. Ce nombre relativement élevé d'éléments poutres est choisi pour limiter les erreurs intrinsèques à la formulation de l'élément de Timoshenko sous-intégré, afin d'observer uniquement l'erreur liée à la formulation du calcul du gauchissement. Le module de cisaillement G vaut 12,5 GPa. La section de la poutre est rectangulaire, de dimensions $0{,}1\,\mathrm{m} \times 0{,}2\,\mathrm{m}$. Le maillage de la section est composé de 64 éléments, et est représenté sur la figure 2.

Le profil de déformations de cisaillement ε_{xz} obtenu par la formule (13) est tracé sur la figure 3. En accord avec le chargement appliqué, les déformations dans la section multifibre, calculées aux points d'intégration, ne varient pas selon y. On choisit alors la première colonne de points d'intégration pour tracer les valeurs de ε_{xz} obtenues numériquement sur la figure 3.

La figure 3 montre ainsi que la déformation de cisaillement transversal ε_{xz} est très bien calculée par l'élément multifibre enrichi. Des études complémentaires ont été menées sous cisaillement transversal et torsion, pour finaliser la validation de l'élément multifibre [2].

4 Applications structurelles

Une fois la formulation et l'implémentation de l'élément poutre multifibre validées, des tests numériques sont réalisés à l'échelle structurelle pour analyser l'influence de la prise en compte du gau-

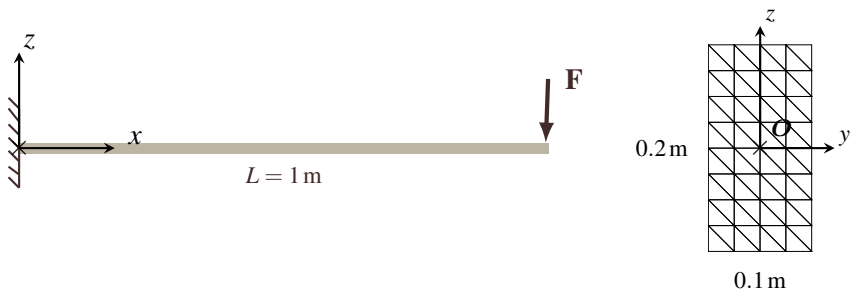
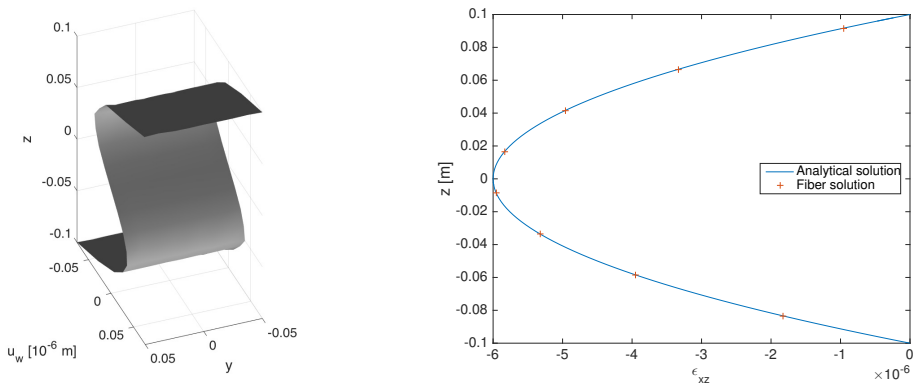


FIGURE 2 – Cas test pour la validation analytique de l'élément enrichi, sous sollicitation de cisaillement dû à l'effort tranchant : géométrie et chargement de la poutre ; et représentation du maillage de section utilisé.



(a) (b)

FIGURE 3 – Comparaison de la solution analytique et de la solution multifibre avec élément enrichi, sous effort tranchant appliqué dans la direction z

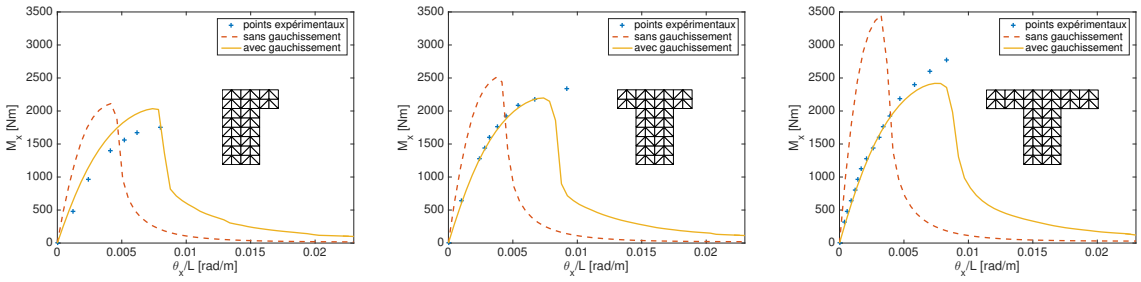
chissement dans la modélisation. Le comportement de poutres en torsion testées expérimentalement est présenté dans un premier temps, suivi par un calcul dynamique sur une maquette de structure.

4.1 Simulations d'essais sur poutres en torsion

Afin d'examiner l'influence du gauchissement sur la réponse structurelle, les essais de poutres en torsion de [5] sont simulés par des calculs multifibres sans et avec enrichissement de gauchissement. Les poutres testées ont une longueur de 1,30 m, et sont discrétisées en 4 éléments multifibres. Différentes formes de sections sont testées, représentées avec le maillage utilisé sur la figure 4. Le chargement est appliqué sous la forme d'une rotation imposée aux extrémités, en 50 pas de 0,03 rad.

Les poutres sont composées de béton pur, modélisé par le MU modèle [14], modèle d'endommagement basé sur le modèle de Mazars [13], avec de bonnes performances en cisaillement et permettant de tenir compte de l'effet unilatéral. Afin de représenter la variabilité du matériau et l'existence de défauts, les valeurs du module d'Young dans les éléments de la section sont distribuées aléatoirement autour d'une valeur moyenne déterminée à partir de la résistance en compression expérimentale. Les paramètres du modèle caractérisant la part non linéaire du comportement sont calés au préalable sur les résultats expérimentaux pour l'une des formes de section, grâce à un algorithme génétique. Le calage des paramètres est effectué séparément pour le modèle multifibre sans enrichissement et avec gauchissement, afin de ne pas privilégier l'une ou l'autre formulation [3]. Les résultats du calcul prédictif sur les autres formes de section, sans et avec enrichissement de gauchissement, sont présentés sur la figure 4.

L'introduction du gauchissement dans le modèle apporte une souplesse structurale supplémentaire en torsion. Le modèle sans gauchissement surestime la rigidité initiale pour chacun des cas-tests. En moyenne, la rigidité de torsion est ainsi prédite avec une précision accrue de 90 % par le modèle avec gauchissement. La précision avec laquelle est déterminé le moment au pic est comparable pour les deux



(a) (b) (c)

FIGURE 4 – Comparaison des courbes moment-rotation obtenues expérimentalement et par prédiction numérique (sans recalage de paramètres matériau). 4(a) section Ls ; 4(b) section Ts ; 4(c) section T.

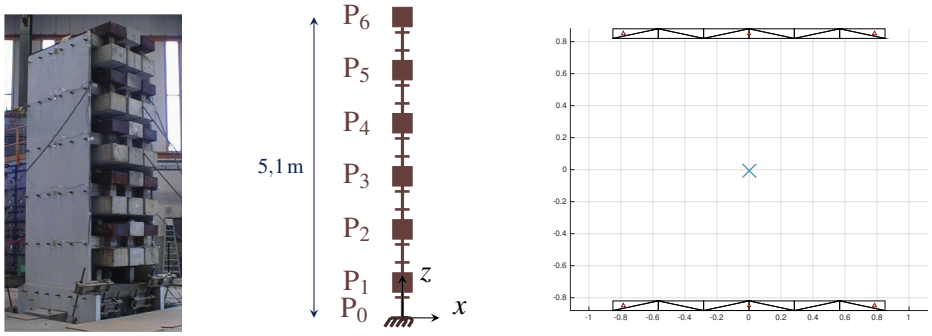
modèles, grâce au calage indépendant des paramètres du modèle matériau sans et avec gauchissement, mais la rotation à rupture est systématiquement sous-estimée par le modèle sans gauchissement, qui présente un comportement plus fragile. Il n'y a pas de comparaison post-pic possible avec les résultats expérimentaux, car les spécimens en béton pur ont tous rompu de manière brutale au pic [5].

Le résultat de ces tests atteste donc de l'importance de la prise en compte du gauchissement dans le modèle numérique lorsque l'on souhaite simuler le comportement de poutres en torsion. Ce gain de précision est obtenu au coût d'un temps de calcul multiplié par 2,5 en moyenne, ce qui est important, mais non prohibitif pour des calculs à l'échelle d'une structure complète.

4.2 Structure soumise à une sollicitation sismique

Dans cette partie, la formulation de l'élément multifibre avec gauchissement est appliquée à la maquette de la structure CAMUS, figure 5(a) [4]. La structure est constituée de deux murs parallèles en béton armé, de section 1,70 m × 0,06 m, joints par des planchers. La structure comporte 5 étages, chacun d'une hauteur de 0,90 m, et repose sur un soubassement plus large d'une hauteur de 0,60 m. Des signaux synthétiques d'intensité croissante sont appliqués à la base de la structure dans le plan des murs, par l'intermédiaire d'une table vibrante.

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'effet de l'introduction du gauchissement sur la réponse numérique de la structure. Le modèle numérique de la maquette CAMUS utilisé ici se base sur celui établi par [6], modèle brochette avec masses concentrées au niveau des planchers. La discrétisation de la structure est représentée sur la figure 5(b). Chaque étage est subdivisé en 3 éléments multifibres, le soubassement étant subdivisé en 2 éléments multifibres. Le maillage de section utilisé est représenté sur la figure 5(c). La section est composée des deux murs en béton de la maquette, chacun maillé par 12 éléments triangulaires, et 3 triangles d'acier représentant les armatures longitudinales. Les modes propres numériques de la structure sont calculés sans et avec gauchissement dans le modèle, puis un calcul dynamique non linéaire est réalisé avec les deux modèles, par application d'un accélérogramme en pied de structure. Le déplacement en tête au cours du temps est tracé sur la figure 6.



(a) (b) (c)

FIGURE 5 – Modèle numérique de la maquette CAMUS

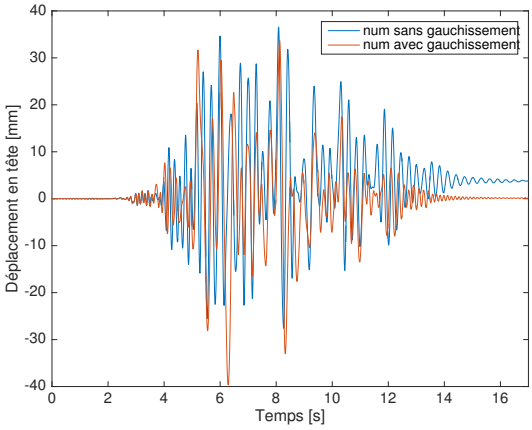


FIGURE 6 – Déplacement du point P_6 au cours du temps : comparaison des résultats numériques avec et sans gauchissement.

Avec l'ajout du gauchissement dans le modèle, les modes de flexion sont diminués de 5%. La structure modélisée avec gauchissement est plus souple que la structure sans gauchissement, ce qui est cohérent avec la diminution de rigidité théorique pour une poutre gauchie et avec la diminution de rigidité observée en torsion. Cette différence de fréquences propres de la structure selon le modèle choisi induit un déphasage progressif des courbes du déplacement en tête, observé sur la figure 6. La différence de fréquences, bien que paraissant faible, est aussi à l'origine d'une réponse différente de la structure au signal sismique appliqué. On voit en effet apparaitre un déplacement résiduel en fin de calcul sans gauchissement, probablement lié à une plastification des aciers, qui n'apparait pas pour le calcul avec gauchissement.

5 Conclusion

Pour répondre à la problématique du manque de précision des éléments finis multifibres en cisaillement, un élément enrichi avec gauchissement est développé. Les degrés de liberté de gauchissement sont interpolés aux noeuds des éléments poutres et sont calculés simultanément aux degrés de liberté classiques dans une procédure de calcul implicite. Les cas-test sur poutres en torsion monotone ont démontré l'importance de la prise en compte du gauchissement dans le modèle pour prédire le comportement de structures en torsion, dans le domaine linéaire et non linéaire. Le temps de calcul de la formulation enrichie est accru, mais un calcul à l'échelle de la structure reste possible. Le calcul dynamique de la maquette CAMUS montre l'applicabilité de la méthode à une structure complète et l'influence du gauchissement sur le déplacement en tête sous séisme, influence qui serait certainement plus importante encore sur des structures moins élancées. De plus, des études complémentaires ont montré l'influence du gauchissement sur la répartition de l'endommagement à l'échelle de la section [2].

Pour améliorer l'efficacité de la méthode, et donc réduire le coût de calcul additionnel engendré par l'enrichissement, la programmation peut être optimisée. L'enrichissement pourrait être implémenté dans des éléments poutres d'ordre supérieur, ou avec des sections discrétisées par des éléments quadratiques. Une formulation permettant de condenser les degrés de liberté de gauchissement sur les degrés de liberté classiques de la section serait à développer, afin de permettre le dialogue entre différents types d'élément au sein d'une même structure et imaginer un maillage modulé en fonction des besoins de précision de la modélisation.

Références

[1] Jesus M Bairan and Antonio R Mari. Multiaxial-coupled analysis of rc cross-sections subjected to combined forces. *Engineering structures*, 29(8) :1722–1738, 2007.

[2] Sophie Capdevielle. *Introduction du gauchissement dans les éléments finis multifibres pour la modélisation non linéaire des structures en béton armé*. PhD thesis, Communauté Université Grenoble Alpes, 2016.

[3] Sophie Capdevielle, Stéphane Grange, Frédéric Dufour, and Cédric Desprez. A multifiber beam model coupling torsional warping and damage for reinforced concrete structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(8) :914–935, 2016.

[4] CEA. Camus international benchmark. experimental results. synthesis of the participant reports. Technical report, CEA Saclay, France, 1998.

[5] Constantin E Chalioris and Chris G Karayannis. Effectiveness of the use of steel fibres on the torsional behaviour of flanged concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 31(5) :331–341, 2009.

[6] Marco De Biasio. *Ground motion intensity measures for seismic probabilistic risk analysis*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2014.

[7] Jean-François Dubé. Modélisation multicouche des voiles en béton armé. *Revue française de génie civil*, 1(2) :285–307, 1997.

[8] S. Grange, P. Kotronis, and J. Mazars. Numerical modelling of the seismic behaviour of a 7-story building : NEES benchmark. *Materials and Structures*, 42(10) :1433–1442, December 2008.

[9] Stéphane Grange. Modèles multi-échelles et algorithmes pour les simulations dynamiques : application ‘a la vulnérabilité sismique des structures. Habilitation à diriger des recherches, Université de Grenoble-Alpes, 2015.

[10] Panagiotis Kotronis, J Mazars, Stéphane Grange, and Cédric Giry. Simplified modeling strategies for non linear dynamic calculations of rc structural walls including soil-structure interaction. In *IASS-IACM*, 2008.

[11] Véronique Le Corvec. *Nonlinear 3d frame element with multi-axial coupling under consideration of local effects*. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2012.

[12] J Mazars, P Kotronis, and L Davenne. A new modelling strategy for the behaviour of shear walls under dynamic loading. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(4) :937–954, 2002.

[13] Jacky Mazars. A description of micro-and macroscale damage of concrete structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 25(5) :729–737, 1986.

[14] Jacky Mazars, François Hamon, and Stéphane Grange. A new 3d damage model for concrete under monotonic, cyclic and dynamic loadings. *Materials and Structures*, pages 1–15, 2014.

[15] Jacky Mazars, Panagiotis Kotronis, Frédéric Ragueneau, and Géraldine Casaux. Using multifiber beams to account for shear and torsion : Applications to concrete structural elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(52) :7264–7281, 2006.

[16] Enrico Spacone and Sherif El-Tawil. Nonlinear analysis of steel-concrete composite structures : State of the art. *Journal of Structural Engineering*, 130(2) :159–168, 2004.