

ANALYSE DU COMPORTEMENT D'UNE POUTRE RENFORCÉE PAR UN MATÉRIAU COMPOSITE

Driss BOUHRARA

ESTP Cachan

T. CROSTON, L. GUILLAUMAT

ENSAM Bordeaux

1. INTRODUCTION

La réalisation d'un ouvrage d'art ou d'une structure en génie civil regroupe un ensemble de poutres qui constituent l'ossature de l'ouvrage. Lors de la mise en service, chaque poutre du groupe est soumise à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques. Ces contraintes ont une influence importante sur la durée de vie des poutres.

Après un temps indéterminé du fonctionnement de la structure, des dégradations et des fissures se manifestent au sein de ces poutres. Elles sont dues à plusieurs paramètres, et principalement au vieillissement. La prise en compte de ces états de contraintes implique une réflexion sur de nouvelles bases de conception. Le plus simple est de trouver, lors de la mise en œuvre, des solutions adéquates pour une éventuelle réhabilitation, un renforcement ou une réparation. C'est dans cette optique de renforcement que nous allons orienter notre réflexion.

Le but donc de ce travail est d'analyser l'influence d'un renfort par une tige creuse en composite sur le cycle de vie d'une poutre en béton. En effet, une poutre en béton ou béton armé sollicitée en flexion trois points a tendance à se fissurer en son milieu. Avec l'incorporation d'une tige creuse en composite, des essais de flexion simple nous ont indiqué expérimentalement un accroissement significatif de la résistance de la poutre.

La littérature délivre un aperçu global sur les essais de flexion de poutres en béton ou béton armé. Les essais sont bien maîtrisés dans la plupart des laboratoires de recherche, selon des normes en vigueur. Dans la vie courante, on retrouve ce genre de chargement en flexion de structures en grandeur nature. L'exemple courant est celui d'une poutre d'un pont sous sollicitations mécaniques. Considérant cet ouvrage sous un cycle de charge - décharge, après un intervalle de temps, un endommagement par microfissurations apparaît. Il est dû à plusieurs paramètres qui conditionnent le cycle de la structure. La durée de vie est une fonction donc, du degré d'endommagement occasionné. Au fur et à mesure du vieillissement dans le temps, les microfissurations progressent et donnent naissance à une fissure apparente qui induit une instabilité ou une ruine totale.

Avant d'arriver à ce point critique, une solution appropriée est nécessaire. Cette solution doit inclure des coefficients de prédiction de la durée de vie.

2. RÉSISTANCE EN FLEXION

2.1 Réalisation des éprouvettes

Les échantillons sont préparés suivant les prescriptions d'un dosage bien défini en ciment, sable, gravillon et eau.

Après malaxage, le béton est diversifié dans un moule comportant trois compartiments. Un compartiment libre sert à la confection d'une éprouvette témoin. Les deux autres compartiments contiennent des tiges creuses en composites. La figure (Fig.1) ci-dessous indique les caractéristiques dimensionnelles et la disposition de la tige du renfort.

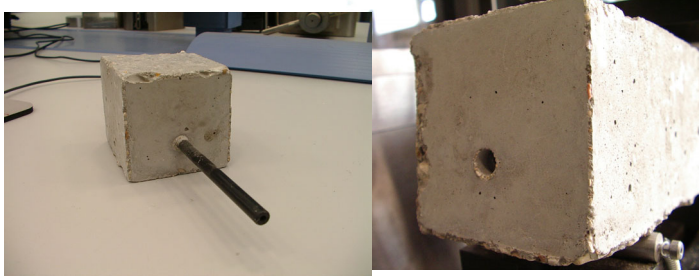


Fig.1 Poutre munie d'une tige en composite

La tige composite est une combinaison de fibres de carbone noyées dans une matrice époxy. Les fibres ont une orientation unidirectionnelle.

Les paramètres géométriques de la tige dépendent du cas de charge de la poutre. D'où, lors de la conception d'une structure, son dimensionnement permet de définir le choix de la tige correspondante. Les éprouvettes réalisées pour notre étude sont de forme prismatique 70.70.280 mm³. Des essais de flexion trois points permettent d'interpréter le mécanisme influant sur la résistance des poutres testées.

2.2 Essai de flexion

Caractériser la résistance d'un matériau, nécessite des machines sophistiquées et performantes. Elles sont les instruments de bases indispensables pour l'analyse expérimentale. La machine dont nous disposons est une machine universelle électromécanique de traction. Tous les essais sont quasi statiques et sont programmés avec une vitesse faible.

Le montage de la poutre à tester est classique, c'est un essai de flexion simple (Fig.2).

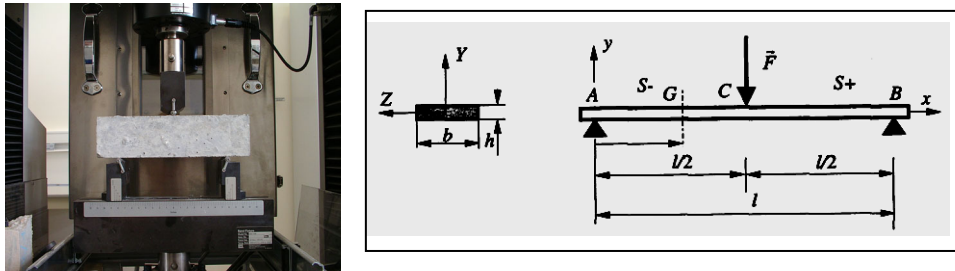


Fig.2 Montage de la poutre en flexion trois points

La poutre de longueur L est rectiligne, horizontale et de section constante. Elle repose sur deux appuis simples. Pour un matériau supposé homogène et isotrope, et suivant les hypothèses de la résistance

des matériaux, la déformée est donnée par l'équation :
$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M_z}{EI_{Gz}}$$

M_z : moment de flexion

E : module élastique

I_{Gz} : moment quadratique

La distribution du champ des contraintes est donnée par :
$$\sigma_{(M)} = \frac{M_z}{I} y$$

La loi de comportement peut être traduite expérimentalement par la courbe qui regroupe la force et le déplacement ou par une relation entre la contrainte et la déformation. L'équation qui résulte de cette relation est une fonction propre à chaque matériau. Dans le cas de notre poutre en béton sans tige, la

figure (Fig.3) schématise ce comportement qui trace l'évolution de la charge en fonction du déplacement.

Cette courbe servira comme modèle de comparaison avec celle d'une poutre renforcée par une tige en composite. Lors du déroulement des essais mécaniques, il est donc important d'observer le type de propagation des fissures, les valeurs maximales et les mécanismes de rupture.

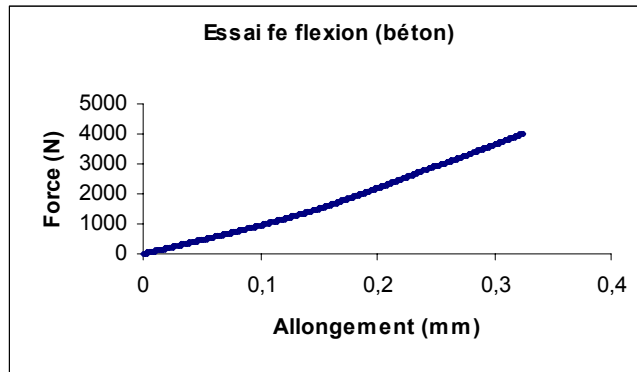


Fig.3 Essai de flexion 3 points

Généralement, pour une poutre en béton ou béton armé sollicitée en flexion, les mécanismes de rupture se manifestent par des amorces de fissures. Leurs origines sont causées par un moment fléchissant ultime ou par cisaillement. La rupture par cisaillement est due soit à la contrainte principale oblique, soit à la compression par cisaillement ou soit à l'adhérence par cisaillement. La rupture par flexion peut se produire par la plastification de l'armature tendue associée à la compression du béton. D'où l'intérêt, pour un dimensionnement correct d'une structure, de bien déterminer les paramètres de calcul et en particulier celui du moment fléchissant.

Le calcul du moment fléchissant ultime M_u selon l'eurocode2, le BAEL et l'ACI est mentionné ci-après. La comparaison des règles européenne (EC2_04), française (BAE_91) et américaine (ACI_89) pour le calcul des poutres en béton armé soumises aux états limites ultimes est présentée ainsi. Les principales différences entre les codes sont : les valeurs limites des déformations unitaires des matériaux, la valeur de la résistance en compression du béton f_{cd} , le coefficient λ (définissant la hauteur utile de la zone comprimée) et le coefficient η (définissant la résistance effective). Les équations pour déterminer la valeur de f_{cd} , les coefficients λ et η sont indiquées sur la figure (Fig.4)

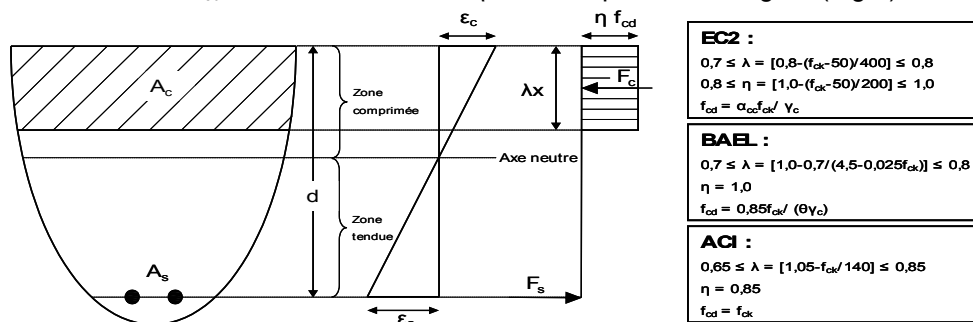


Fig.4 Section transversale d'une poutre en béton armé en flexion simple

3. COMPORTEMENT D'UNE POUTRE RENFORCÉE PAR UNE TIGE EN MATÉRIAU COMPOSITE

A ces mécanismes de rupture cités dans le paragraphe précédent s'ajoutent des dégradations chimiques. Elles sont dues à la corrosion des aciers. D'où l'intérêt de pouvoir remplacer le renforcement traditionnel par des matériaux composites relativement inertes à l'oxydation.

Pour le renforcement des structures, les expériences et les projets menés jusqu'à présent utilisent des matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ces matériaux utilisés pour le renforcement de poutres se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques

stratifiées préalablement fabriquées. Le comportement observé avec ce type de renforcement est plus performant que celui des poutres renforcées par des aciers. Ainsi l'amélioration de la durée de vie des ouvrages est due aux propriétés chimiques, physiques et surtout mécaniques des composites. En effet, les directions du renfort sont complètement paramétrables. (Ham_06) signale que les effets de renforcement, notamment vis-à-vis de l'effort tranchant, sont particulièrement prometteurs en devinant tous les avantages apportés par ces nouveaux systèmes, dans le cadre général du développement durable, notamment vis-à-vis des conditions d'hygiène, de sécurité et des conditions de recyclabilité. Comme cela a été montré précédemment, le béton se dégrade sous l'action de nombreux facteurs. Compte tenu du coût des structures de génie civil, il est important de pouvoir les réparer afin d'augmenter leur durée de vie. Ainsi, il convient de vérifier la bonne compatibilité entre le matériau de réparation et l'élément à réparer en garantissant une bonne adéquation entre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du renfort et du substrat.

En introduisant une tige au sein de la poutre en béton, son comportement en flexion est modifié. Pour mesurer ce degré de modification, on doit comparer et établir une nouvelle équation de la déformée et déterminer la variation de l'état des contraintes. Cette équation doit tenir compte des causes de l'endommagement et des pertes de résistance.

La méthode de réparation ou de renforcement par l'insertion des tiges en composite est bien connue et utilisée dans la réparation des structures en bois (SVE_04). La limitation principale de cette technique consiste en l'accessibilité pour percer de part en part l'axe de l'élément à renforcer. Cependant, les tiges en composites sont désormais une alternative pour le renforcement des structures.

Auparavant, nous avons déjà mené une étude mettant en œuvre des poutres en béton armé renforcées par des barres en matériau composite testées en flexion simple (fig.5).

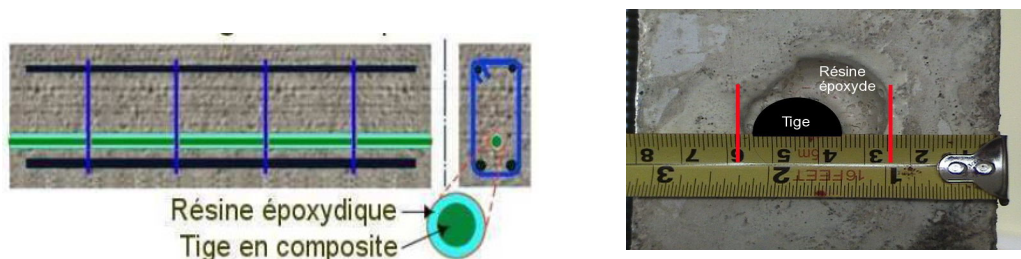


Fig.5 Poutre en BA renforcée par une tige en composite

Afin de créer un degré d'endommagement, chaque poutre non renforcée est testée selon un cycle de charge – décharge jusqu'à une valeur de flèche bien déterminée. Après, son renforcement est réalisé par l'insertion et le collage d'une tige suivant l'axe longitudinal de la zone tendue.

Les poutres renforcées sont de nouveau testées comme auparavant. L'objectif est d'évaluer l'effet de la réparation sur le niveau d'endommagement en comparant leurs résistances ultimes. La figure (Fig.6) et le tableau suivant regroupent l'ensemble des résultats expérimentaux. C'est tout simplement une comparaison entre les poutres (appelées contrôle) en béton armé non renforcées et les poutres (appelées I1III3) réparées après endommagement jusqu'à une certaine valeur de flèche.

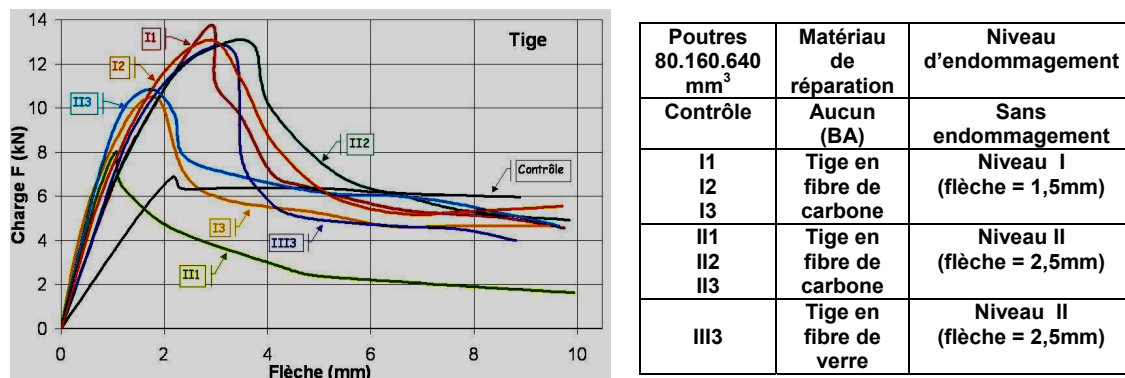


Fig.6 Comportement des poutres avant et après réparation

Certaines poutres sont équipées de capteurs spécifiques pour suivre leur activité acoustique pendant l'essai (CRO_06). Cette émission acoustique a permis d'évaluer leur endommagement interne.

Ce travail réalisé en collaboration extérieure nous a conduit à mesurer l'importance de ce type de réparation et de renforcement. Expérimentalement, un gain significatif de la résistance des poutres renforcées s'est avéré et a été constaté. Par contre, la difficulté majeure de cette méthode réside dans les moyens techniques mis en place pour trouer, placer et coller les tiges à l'intérieur des poutres.

Pour résoudre et apporter des éléments de réponse à ce problème, divers scénarios de résolution ont été envisagés. Notre choix s'est porté finalement sur l'insertion, lors de la mise en œuvre, d'une tige creuse en composite. L'objectif principal est d'accroître la capacité portante des poutres en flexion et en cisaillement, d'alléger leurs poids et de préparer une éventuelle intervention.

En effet, pour des ouvrages importants qui nécessitent une surveillance accrue dans le temps, cette technique de renforcement au préalable s'avérera sûrement intéressante.

Après un endommagement de la poutre la plus sollicitée, il est possible d'introduire des câbles de haute résistance à l'intérieur de la tige composite creuse. Le rôle principal de ces câbles est de soutenir la structure pour une intervention extérieure. De ce fait, il est facile de réhabiliter sans destruction de l'ensemble.

Cet accroissement de résistance nécessite une étude mettant en œuvre une autre approche sur des nouveaux modes de rupture et mécanismes de propagation de fissures. En effet, les équations qui se déduisent et découlent de l'association entre une tige en composite et le béton deviennent de plus en plus complexes. En plus, l'optimisation de la performance des structures mettant en jeu ce procédé va dépendre essentiellement du dimensionnement des tiges.

Dans tout ce qui suit l'indice b correspondra au béton et l'indice t correspondra à la tige en composite. Généralement, l'hypothèse d'adhérence parfaite entre la tige en composite et le béton permet d'écrire l'égalité des déformations d'un élément infinitésimal d'une fibre de béton au voisinage de la tige :

$\varepsilon_b = \varepsilon_t$ D'un point de vue macroscopique, la loi de Hooke permet d'exprimer cette égalité en

fonction des contraintes : $\frac{E_t}{E_b} = \frac{\sigma_t}{\sigma_b}$ On pose $\frac{E_t}{E_b} = n$

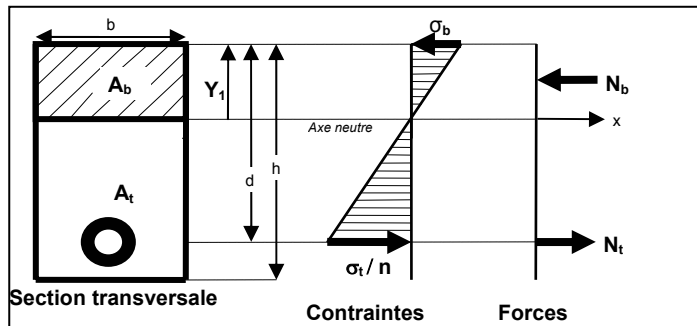


Fig.7 Section transversale d'une poutre en béton renforcée par une tige creuse

D'après la figure (Fig.7), la première équation d'équilibre se détermine en écrivant que la somme des efforts, en projection sur un axe horizontal, est égale à zéro, ce qui donne l'équation suivante :

$$N_t - N_b = 0 ; \quad A_t \cdot \sigma_t - \int_0^{Y_1} \frac{\sigma_b}{Y_1} \cdot y \cdot b \cdot dy = 0$$

La contrainte dans la tige en composite peut s'exprimer en fonction de la contrainte maximale dans le

béton comprimé : $\sigma_t = n \cdot \sigma_b \cdot \frac{d - Y_1}{Y_1}$

En remplaçant ces expressions dans l'équation précédente on trouve l'équation d'équilibre suivante :

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot Y_1^2 - n \cdot A_t \cdot (d - Y_1) = 0$$

Cette équation permet de déterminer l'expression de Y_1 :

$$Y_1 = \frac{-n(A_t) + \sqrt{n^2 \cdot (A_t)^2 + 2 \cdot b \cdot n \cdot (d \cdot A_t)}}{b}$$

La seconde équation d'équilibre se détermine en écrivant que la somme des moments des contraintes agissantes dans la section, par rapport à l'axe neutre, est égale au moment fléchissant appliqué.

$$M_{ser} = \int_0^{Y_1} y \cdot \left(\frac{\sigma_b}{Y_1} \cdot y \right) \cdot b \cdot dy + A_t \cdot \sigma_t \cdot (d - Y_1) \quad \sigma_t = n \cdot \sigma_b \cdot \frac{d - Y_1}{Y_1}$$

Il suffit de remplacer les expressions des contraintes dans la tige pour obtenir l'expression suivante :

$$M_{ser} = \frac{\sigma_b}{Y_1} \left[\int_0^{Y_1} y^2 \cdot b \cdot dy + n \cdot A_t \cdot (d - Y_1)^2 \right]$$

$$I = \int_0^{Y_1} y^2 \cdot b \cdot dy + n \cdot A_t \cdot (d - Y_1)^2 = \frac{1}{3} \cdot b \cdot Y_1^3 + n \cdot A_t \cdot (d - Y_1)^2$$

I est le moment quadratique de la section homogénéisée par rapport au béton.

On déduit, de tout ce qui précède, les expressions de la contrainte maximale de béton comprimé ainsi que la contrainte dans la tige tendue :

$$\sigma_b = \frac{M_{ser}}{I} \cdot Y_1 \quad \sigma_t = n \cdot \frac{M_{ser}}{I} \cdot (d - Y_1)$$

Les valeurs numériques de ces contraintes permettent de vérifier si les états limites de compression du béton et d'ouverture des fissures sont respectés.

3.1 Analyse du comportement de la poutre renforcée

Pour une poutre en béton non renforcée, l'expérience a montré que l'énergie de rupture est libérée brutalement, c'est une caractéristique expérimentale d'une rupture fragile. Une série d'essais est effectuée sur un lot d'éprouvettes qui a donné moyennement une rupture sous une charge déterminée. Pour les poutres en béton avec adjonction de tiges en matériau composite, la rupture est totalement différente. Au fur et mesure du chargement, il y a un grand nombre d'amorces de micro fissures qui progressent et qui deviennent visibles (Fig.8).



Fig.8 Propagation des fissures d'une poutre renforcée

Le faciès de rupture est révélateur d'un mode de fissuration, qui expérimentalement, confirme notre prédiction. Pour une poutre soumise à un essai de flexion trois points, il est évident qu'une partie soit comprimée tandis qu'une autre soit tendue. Dans la partie tendue, on constate par l'expérience que la propagation de la macro fissure est suivant une direction perpendiculaire aux fibres tendues. Par contre, dans la partie comprimée, la pointe de cette fissure bifurque de 45°. Cette bifurcation de la direction de propagation est due aux contraintes de cisaillement maximum, comme le calcul le prévoit par la théorie de Mohr.

Afin d'analyser le comportement de la poutre renforcée vis-à-vis des sollicitations mécaniques, des essais de flexion simple permettent d'établir expérimentalement cette relation entre la contrainte et la déformation. Dans notre cas, le protocole d'essais consiste à charger la poutre, en flexion trois points, jusqu'à sa rupture. En même temps, avec l'accroissement de la charge, une visualisation de la dégradation du béton est nécessaire. En effet, la combinaison entre le béton et la tige augmente

l'hétérogénéité et l'anisotropie de l'ensemble. De ce fait, à l'échelle microscopique, les calculs pour la définition d'une loi de comportement deviennent plus complexes. Ce comportement permet de mettre en évidence l'importance du renforcement. Avec un dimensionnement approprié, l'incorporation d'une tige creuse ne fragilise pas la poutre. Au contraire, un gain très significatif au niveau de capacité résistante et énergétique est prouvé expérimentalement (Fig.9). La nature et la géométrie de la tige du renfort dépendent essentiellement des conditions et efforts extérieurs.

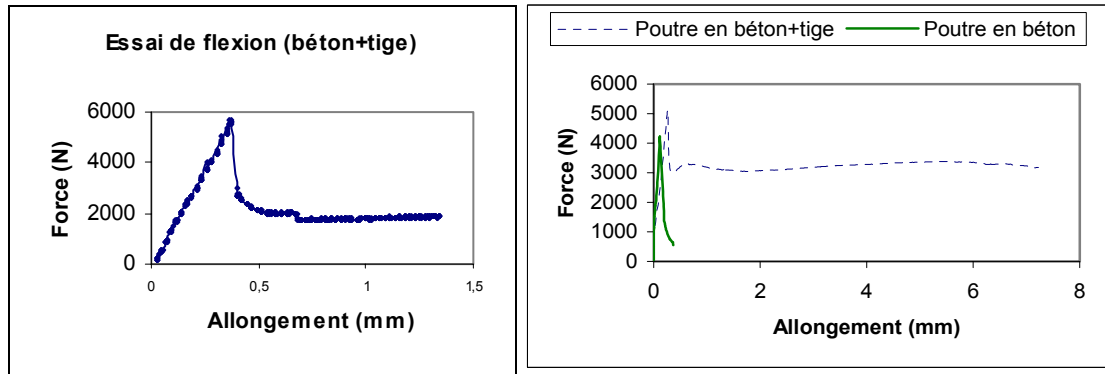


Fig.9 Comportement en flexion d'une poutre renforcée

Pendant la réalisation des essais expérimentaux, un problème majeur qui s'est manifesté et attiré notre attention est le glissement de la tige. Ce glissement se manifeste avant et après rupture totale du béton. Comme la tige doit supporter le maximum de la charge normale exercée en traction, alors les contraintes d'interface entre la tige et le béton croissent. En dépassant un seuil d'adhérence entre les deux matériaux différents, des contraintes de cisaillement peuvent atteindre des valeurs induisant un glissement.

3.2 Comportement de la tige dans le béton

Un autre problème majeur qui se pose est la durabilité des tiges en composite. Dépassé un seuil de contraintes exercées, la résistance du béton devient quasiment nulle. Seule la tige supporte le chargement appliqué. Son endommagement est causé par au moins deux facteurs principaux (Fig.10) :

- une dégradation mécanique par plastification de la résine
- une attaque chimique due à l'écartement des lèvres des fissures qui se propagent dans le béton

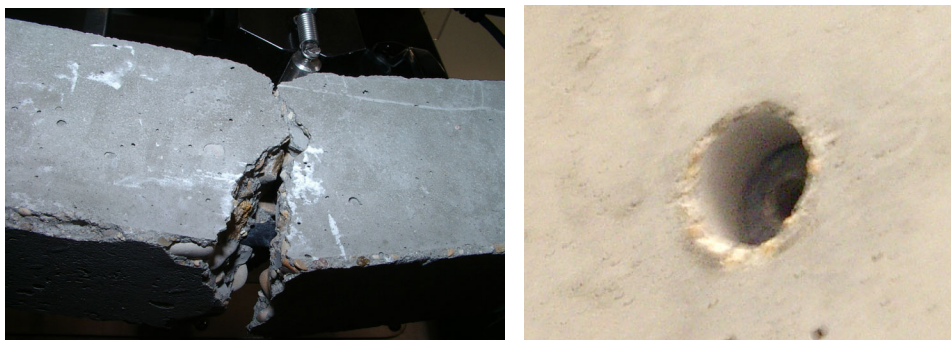


Fig.10 Résistance et glissement de la tige composite

En ce qui concerne le premier facteur, des essais classiques en traction illustrent visiblement le comportement mécanique des tiges composites. Les dégradations mécaniques sont généralement semblables à celles de la famille des matériaux composites, sous sollicitations axiales. Mais le problème qui se pose est que la tige est dans une configuration de chargement combiné, à savoir traction et flexion.

De ce dispositif et montage, trois informations expérimentales et capitales se trouvent dans notre disposition. A la force de chargement exercée par la traverse de la machine et son déplacement s'ajoute un autre paramètre intéressant donné par un capteur de déplacement qui mesure le glissement de la tige. Nous pensons développer ce principe afin d'apporter quelques solutions au problème d'interface entre la tige et le béton. Ce principe doit être vérifié ultérieurement et validé par une simulation numérique.

En ce qui concerne le dernier facteur (MIC_04) a développé un protocole expérimental pour étudier les effets de vieillissement accéléré sur les tiges en composite. Les éprouvettes ont été soumises à une solution qui simule l'alcalinité des pores du béton. Les résultats de cette étude montrent que les propriétés de la résine ont une forte influence sur la durabilité du composite. Les cycles des agents de l'environnement n'endommagent pas significativement les tiges. Les tiges en fibres de verre sont sensibles à l'attaque alcaline lorsque leur résine ne fournit pas une protection adéquate aux fibres.

Pour des tiges collées, l'adhésion entre le béton et la tige en composite est divisée en deux parties, l'adhésion tige - colle et l'adhésion colle - béton. Des études sur l'adhésion du béton - colle - tige ont été réalisées par des essais d'arrachement (DE_L_05). Des contraintes d'adhérence maximum τ_m et des distances de glissement maximum s_m ont été déterminées pour différents types de tiges collées au béton par des résines époxydes.

Pour un point quelconque situé sur l'interface tige ou colle, d'après la figure (Fig.11), la contrainte normale est liée au glissement par la relation

$$\sigma(s) = \sqrt{2\chi A_\tau(s)}$$

χ est le périmètre sur lequel la contrainte d'adhérence agit

$A_\tau(s)$ est l'aire au dessous de la courbe de la contrainte d'adhérence en fonction du glissement

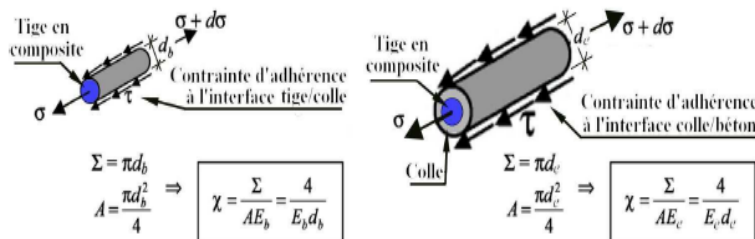


Fig.11 Paramètre χ pour les interfaces tige/colle et colle/béton

Dans notre cas, en absence de la colle, l'examen de l'interface tige/béton est différent de ce qui précède. Puisque la tige est mise en place, lors de la mise en œuvre du béton, alors les contraintes d'adhérence peuvent se calculer en introduisant un coefficient de frottement. Une étude théorique, se basant sur des notions de mécanique de contact, permettra d'établir une formulation prenant en compte ce coefficient. Expérimentalement, ce qui est intéressant de constater est cette évolution du mouvement de la tige en composite. Pendant tout l'accroissement de la charge, on n'a pas remarqué visiblement de glissement. Une fois la poutre est totalement endommagée, sans rupture totale, visuellement la tige commence à glisser. L'explication provient de la contrainte de traction exercée sur la tige. Lorsque la valeur de cette contrainte dépasse celle d'adhérence de la tige au béton, il y a alors glissement. Ce point est très important pour dimensionner ce genre de poutres. Il doit être complété par une étude comparative entre une tige collée et une tige enrobée par le béton.

4. CONCLUSION

Les études réalisées démontrent que l'adjonction de tiges en matériau composite dans une poutre semble être prometteuse tant dans l'accroissement de la résistance de celle-ci et de sa durée de vie que dans la réhabilitation des structures. Ce qui schématise la perspective d'un autre modèle de conception des d'ouvrages.

L'originalité du renforcement par une tige creuse est cette possibilité d'introduire des câbles de soutènement pour des éventuelles interventions. En outre, cette solution permet de réduire considérablement le poids propre de chaque poutre renforcée et donc de l'ensemble de la structure.

Pour optimiser la durabilité du composite, en particulier comportements de la tige face à l'alcalinité du béton et liaison tige – béton, des essais complémentaires s'avèrent cependant nécessaires. Afin de conforter le choix des caractéristiques géométriques de la tige creuse et celles de la poutre, un calcul de dimensionnement s'impose. Ce choix laisse présager une confrontation et vérification entre les résultats du calcul théorique et simulation numérique.

BIBLIOGRAPHIES

(ACI_89) ACI 318-89 Building Code. The structural concrete standard, 1989.

(BAE_91) Règles Beal 91 – Modifiées 99. Editions Eyrolles, 2001, France, 330 p.

(CRO_06) Croston T., Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion trois points réparée par matériaux composites. Thèse 2006, ENSAM Bordeaux.

(COS_97) Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R. Behaviour and modelling of bond of FRP rebars to concrete. J. composite Construction. 1997, vol 1, (2), p. 40-51.

(DE_L_05) De Lorenzis L., Scialpi V., La tegola A. Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timbers. Composites Part B: Engineering, 2005, vol 36, p. 278-289.

(EC2_04) Eurocode 2, « Calcul des structures en béton » et document d'application nationale. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. ENV 1992-1-1. Déc. 2004.

(Ham_06) Hamelin P., Compte rendu de mission au colloque CICE 2006, Composites in Civil Engineering, 13-15 Décembre 2006, Miami, Floride, USA ; www.iifc-hq.org/cice2006.

(MIC_04) Micelli F., Nanni A. Durability of FRP rods for concrete structures. Construction and building material, vol. 18, 2004, p. 491-503.

(SVE_04) Svecova D., Eden R.J. Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars- an experimental investigation. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, vol.31, p.45-55.