

Renforcement de structures: collage de lamelles en fibres de carbone

Autor(en): **Berset, Jean-Daniel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **121 (1995)**

Heft 20

PDF erstellt am: **05.07.2023**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78623>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Renforcement de structures

Collage de lamelles en fibres de carbone

Par Jean-Daniel Berset
Ing. civil dipl.
EPFL/M.Sc. MIT
Bureau d'ingénieurs
Jean-Daniel Berset,
route d'Yverdon 23b,
1028 Prévèrenges

Cet article présente une nouvelle méthode de renforcement de structures, au moyen de lamelles en fibres de carbone collées extérieurement à l'aide de résine epoxy. Des modèles analytiques sont développés ainsi qu'une procédure de dimensionnement permettant à l'ingénieur praticien de vérifier la sécurité structurale et l'aptitude au service de l'élément renforcé. Les paramètres de projets et les conditions d'application sont mis en évidence.

Introduction

On admet généralement que la durée d'exploitation d'un ouvrage est de cinquante à cent ans, suivant son importance ou sa fonction. Durant une telle période, on peut s'attendre à des modifications importantes des conditions qui ont présidé à l'élaboration du projet initial. Changements d'affectation, corrosion des aciers d'armature, carbonatation du béton sont quelques-unes des causes les plus fréquentes à l'origine d'une capacité structurale insuffisante, pouvant conduire à limiter ou interdire l'utilisation d'un ouvrage. On peut mentionner d'autres sources propres à réduire l'utilisation d'un ouvrage telles qu'un dimensionnement erroné ou des dommages causés par un incendie ou un tremblement de terre.

Nous disposons aujourd'hui de techniques de réhabilitation, telles que l'augmentation des sections de béton, le recours à des câbles de précontrainte extérieurs ou le renforcement au moyen d'armatures collées, qui permettent de modifier ou de renforcer une structure en fonction de nouvelles contraintes et de la rendre conforme aux critères de sécurité et d'aptitude au service.

Une de ces méthodes de renforcement consiste à coller des plaques d'acier au moyen de colles epoxy. Il est ainsi possible d'améliorer les performances mécaniques d'un élément structural en remplaçant ou en complétant les armatures à la traction ou au cisaillement. Depuis les premières études réalisées par L'Hermite [1]¹ en 1967, de nombreuses applications ont démontré l'efficacité et la fiabilité de cette technique lorsqu'elle est correctement mise en œuvre. Malgré ces garanties, la méthode comporte quelques défauts liés essentiellement à l'utilisation de l'acier, dont les principaux désavantages résident dans son poids volumique élevé – qui rend difficile la manutention des plaques et alourdit singulièrement le système d'étaiyage –, et dans sa vulnérabilité aux agressions chimiques. De plus, la longueur limitée des plaques d'acier nécessite parfois le recours à des joints.

Une méthode alternative permettant d'éliminer ces défauts consiste à remplacer l'acier par des matériaux composites, tels que les fibres de carbone, qui présentent des propriétés exceptionnelles: très haute résistance à la traction et à la fatigue, très faible poids volumique, excellent comportement dans des environnements corrosifs ou électromagnétiques. La conception de ce type de renforcement à l'aide de lamelles en fibres de carbone est similaire à celle faisant usage de plaques en acier. La liaison entre le béton et les lamelles est réalisée au moyen d'une colle epoxy.

Le poids volumique très faible et la résistance élevée propres à ce type de matériaux permet de réduire de façon radicale le poids des lamelles. En outre, la résistance des fibres de carbone aux agressions chimiques évite toute dégradation à long terme du matériau composite par corrosion. Cette dernière propriété peut s'avérer déterminante pour l'application à des ouvrages d'art subissant les effets des intempéries ou du sel de dégivrage, ainsi qu'en présence de courants vagabonds. De plus, les lamelles peuvent être stockées enroulées sur elles-mêmes et dimensionnées à n'importe quelle longueur, ce qui rend les joints superflus.

Grâce aux travaux menés au Laboratoire fédéral d'essai des matériaux (LFEM/EMPA) et aux recherches du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), nous disposons d'une nouvelle technologie de renforcement améliorant de façon significative les techniques de structures collées utilisées à ce jour. Le présent article en expose les fondements et présente un modèle de calcul, ainsi qu'une procédure de dimensionnement.

Lamelles en fibres de carbone

Les matériaux composites sont fabriqués à l'aide de fibres de verre, de carbone ou d'aramides liées par une matrice. Les produits ainsi obtenus présentent des propriétés mécaniques proches de celles des fibres et garantissent une résistance chimique similaire à celle de la matrice.

Quelque 12 000 fibres de carbone, d'un diamètre de l'ordre de sept microns, sont assemblées sous forme de cordons que l'on passe dans un bain de résine synthétique. La forme définitive de lamelle est donnée par un moule et la dernière étape consiste à passer le tout dans un four de durcissement.

Les caractéristiques mécaniques obtenues dépendent de plusieurs facteurs dont les plus importants sont le type et le volume des fibres, ainsi que leur orientation. Les lamelles présentent une structure hétérogène, similaire dans une certaine mesure à celle du bois: dans le sens transversal, leurs propriétés mécaniques sont médiocres, si bien que la direction des sollicitations doit impérativement cor-

respondre à celle des fibres. Le tableau 1 donne les caractéristiques d'un des matériaux usuellement choisis dans des applications de renforcement de structures en béton, et les diagrammes de contrainte-déformation spécifiques des lamelles en fibres de carbone sont donnés à la figure 1, où ils sont comparés à celui de l'acier Fe E235.

Afin d'éviter des conséquences catastrophiques, il est en outre primordial de connaître l'effet de la température sur les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans ce type de renforcement. Bien que les fibres dépendent aussi de ce facteur, les résines epoxy présentent une très faible stabilité aux variations de température: lorsque cette dernière avoisine la température de verre, soit environ 60°C, on observe une brusque dégradation du module de glissement, comme le montre la figure 2.

Modèle de calcul

Après la mise en place d'un renforcement, il peut arriver que le «maillon faible» de la structure considérée corresponde à une nouvelle zone qui devient alors le cas déterminant. L'amélioration des performances structurales n'est effective que si la résistance de chaque élément contribuant au transfert des charges additionnelles est suffisante. De ce fait, il est important d'identifier tous les modes de rupture possibles afin d'évaluer correctement la sécurité ou l'aptitude au service de l'élément structural renforcé.

La figure 3 représente schématiquement les modes de rupture pouvant entraîner la ruine de la structure et qui peuvent être décrits comme suit:

Tableau 1: Propriétés des lamelles en fibres de carbone, type T700 Toray industries, Japan

Matériau	T700
Fraction de volume des fibres [%]	> 60
Résistance à la traction [N/mm ²]	> 2400
Module d'élasticité [N/mm ²]	> 150 000
Allongement à la rupture [%]	> 14
Densité apparente [g/cm ³]	1,6

- 1) Rupture de la lamelle de fibres de carbone. Comme précédemment mentionné, le matériau a un comportement linéaire jusqu'à la ruine. La rupture se produit soudainement accompagnée d'un bruit d'explosion.
- 2) Rupture des aciers d'armature longitudinaux. Ce cas peut se présenter lorsque la résistance à la fatigue est atteinte. L'allongement au stade de rupture des aciers est telle qu'il est peu probable que ce soit la cause ayant entraîné la ruine de l'élément structural. C'est pourquoi, le critère de rupture est donné par un allongement spécifique limite des aciers et non par sa valeur ultime ($\epsilon_{y \text{ lim}} < \epsilon_{y \text{ ult}}$).
- 3) Rupture du béton dans la zone comprimée.

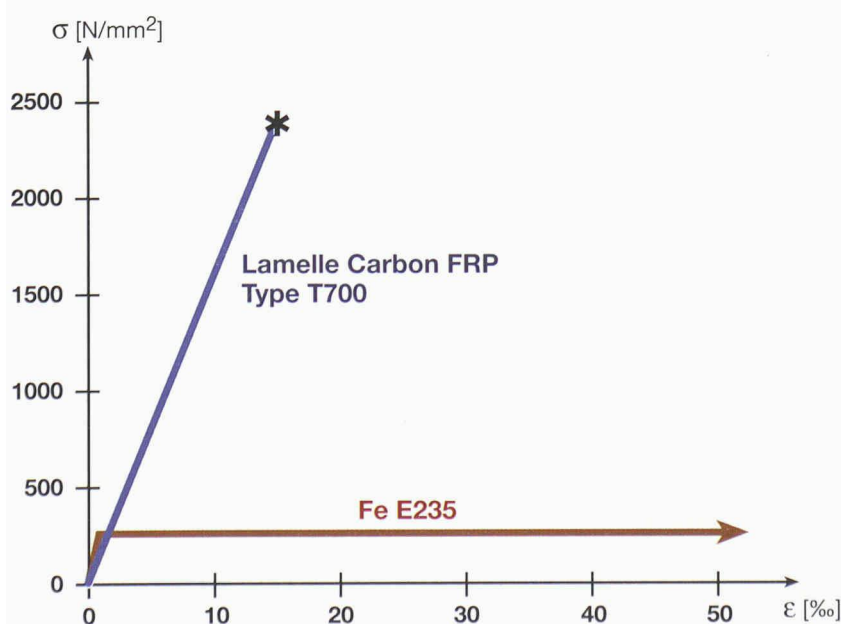


Fig. 1. – Diagramme contrainte-déformation de lamelles Carbon FRP et de l'acier Fe E235

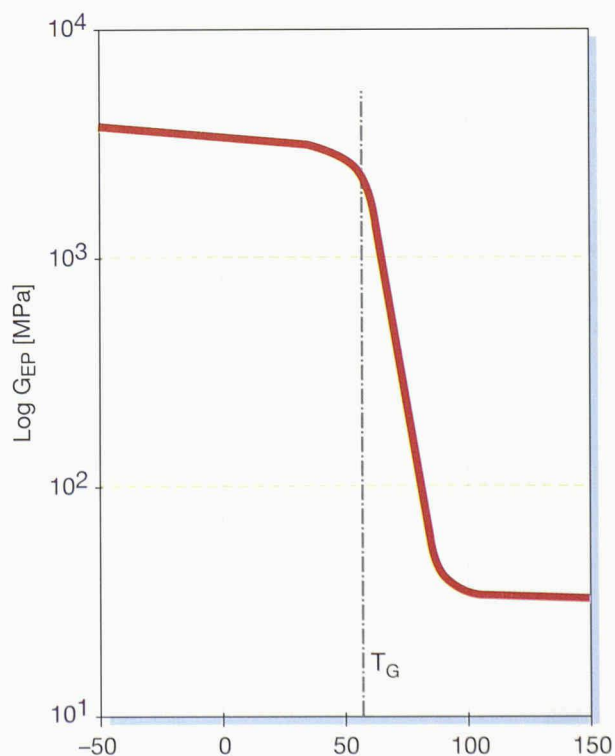


Fig. 2. – Diagramme module de glissement-température

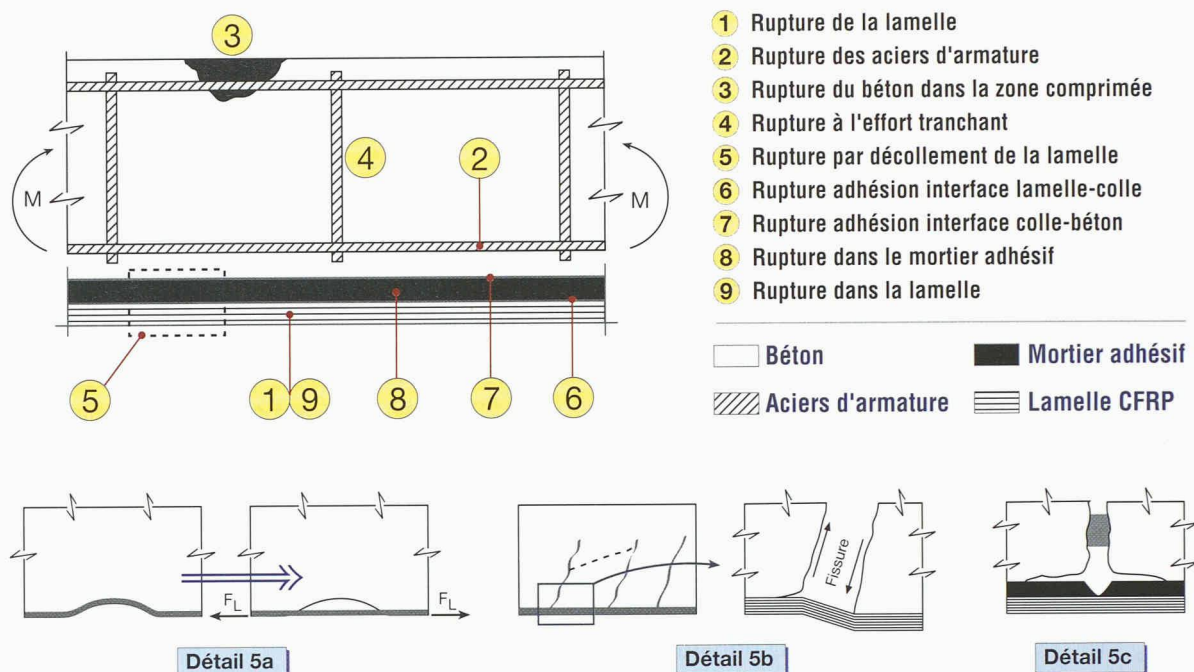


Fig. 3. – Modes de rupture d'un élément structural renforcé au moyen de lamelles en fibres de carbone

- 4) Rupture à l'effort tranchant. La contribution des lamelles à la résistance à l'effort tranchant est totalement négligeable.
- 5) Rupture par décollement de la lamelle. Plusieurs paramètres déterminent ce mode de ruine:
 - les inégalités du support (détail 5a) ou le déplacement relatif des deux lèvres d'une fissure, résultant d'efforts tranchants et de flexion (détail 5b), engendrent des contraintes perpendiculaires à la surface de la lamelle qui peuvent dépasser les valeurs admissibles;
 - les efforts dans la lamelle étant transmis par cisaillement au support, les contraintes tangentielles qui se développent dans la couche du mortier adhésif ne peuvent dépasser les valeurs caractéristiques des matériaux en présence. Le détachement de la lamelle intervient, généralement, suite à la rupture du béton sur sa face inférieure au dessus de l'interface béton-colle.
- 6), 7) Rupture aux interfaces. Cela peut se produire lorsqu'il y a défaillance de l'adhésion à l'interface de deux matériaux, lamelle-colle (6) ou colle-béton (7). Ce mode de ruine peut être grandement facilité par une préparation insuffisante des surfaces ou par un mauvais choix de matériaux.
- 8), 9) Rupture dans les matériaux de renforcement. La défaillance de la cohésion dans le mortier adhésif (8) peut être le résultat d'une mauvaise préparation du mélange ou de conditions de température défavorables.

Nous présentons ci-après un modèle analytique permettant de calculer les différents paramètres nécessaires au dimensionnement des lamelles de fibres de carbone.

Considérant comme valide l'hypothèse de Bernoulli, nous admettons que les sections planes restent planes après déformations. Nous supposons

que les matériaux se comportent conformément aux données retenues par la norme SIA 162 [2], notamment les lois contrainte-déformation de l'acier et du béton. Les contributions du béton dans les zones en traction et de l'acier d'armature dans les zones en compression sont négligées.

Considérons une section rectangulaire en béton armé. La figure 4 définit les efforts intérieurs, les déformations spécifiques, les contraintes et les forces intérieures. A partir de ces hypothèses et de simples considérations d'équilibre, nous pouvons exprimer la formulation mathématique suivante:

$$\sum F = 0; \quad F_{St} + F_{Lt} - F_{cc} = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0; \quad F_{Lt}(h - \chi_2 x) + F_{St}(d - \chi_2 x) - M = 0 \quad (2)$$

Sur la base des conditions de compatibilité, nous pouvons définir les allongements spécifiques propres à chaque composant, à savoir:

pour le béton:

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_L}{h - x} x + \varepsilon_{c0} \quad (3)$$

pour l'acier:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_L}{h - x} (d - x) + \varepsilon_{s0} \quad (4)$$

où les paramètres ε_{c0} et ε_{s0} tiennent compte des allongements initiaux, respectivement dans le béton et l'acier, avant le renforcement, en considérant la valeur de la sollicitation correspondante S_0 . Le comportement du béton est introduit dans le calcul à l'aide de la loi contrainte-déformation selon la norme SIA 162 [2]. La force de compression F_{cc} dans le béton peut être déterminée par:

$$F_{cc} = \chi_1 b x f_c \quad (5)$$

En fonction de la valeur de la déformation spécifique du béton exprimée en ‰, les coefficients de remplissage χ_1 et de position χ_2 sont obtenus comme suit:

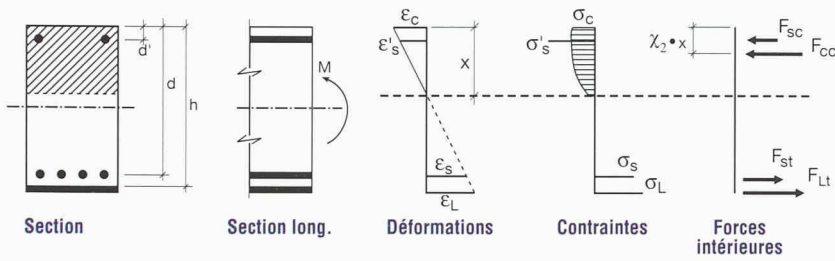


Fig. 4. – Diagrammes des efforts intérieurs, des déformations spécifiques, des contraintes et des forces intérieures

pour $\varepsilon_c \geq 2\text{‰}$

$$\chi_1 = \frac{3 \varepsilon_c - 2}{3 \varepsilon_c} \quad (6)$$

$$\chi_2 = \frac{\varepsilon_c (3 \varepsilon_c - 4) + 2}{2 \varepsilon_c (3 \varepsilon_c - 2)} \quad (7)$$

pour $\varepsilon_c \leq 2\text{‰}$

$$\chi_1 = \frac{\varepsilon_c (6 - \varepsilon_c)}{12} \quad (8)$$

$$\chi_2 = \frac{8 - \varepsilon_c}{4 (6 - \varepsilon_c)} \quad (9)$$

Comme représenté schématiquement à la figure 5, les contraintes et les allongements relatifs varient considérablement le long d'un élément fissuré. Les allongements spécifiques sont calculés en considérant les déformations moyennes, alors que l'équilibre fait appel aux forces correspondant aux déformations maximales. Il en résulte les définitions suivantes:

$$\varepsilon_{Lm} = \kappa_L \varepsilon_{Lmax} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{Sm} = \kappa_S \varepsilon_{Smax} \quad (11)$$

Les coefficients d'adhérence κ sont des valeurs difficiles à déterminer. On peut donner les ordres de grandeur suivants [3]:

Lamelle: $\kappa_L = 0,65 \div 0,8$ pour $\sigma_{Lmax} = \sigma_{Lu}$

Acier: $\kappa_S = 0,90 \div 1,0$ pour $\sigma_{Smax} = f_{ys}$

En phase de rupture, en introduisant l'équation (10), l'expression (3) peut s'écrire:

$$\varepsilon_c = \frac{\kappa_L \varepsilon_{Lu}}{h - x} x + \varepsilon_{c0} \quad (12)$$

L'équation (1), en remplaçant ses composants par leur valeur ultime, devient:

$$A_S f_{ys} + A_L f_{Lu} - \chi_1 b x f_c = 0 \quad (13)$$

La position de l'axe neutre, défini par la variable x , est obtenu par itérations successives comme suit: – estimation de x

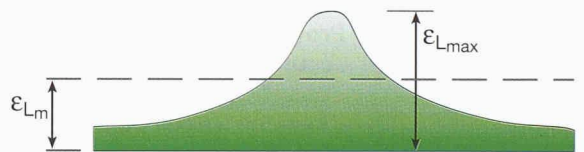
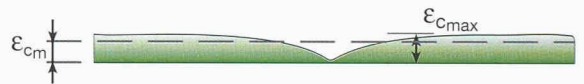
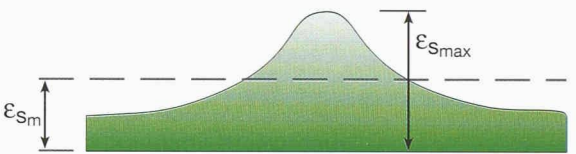
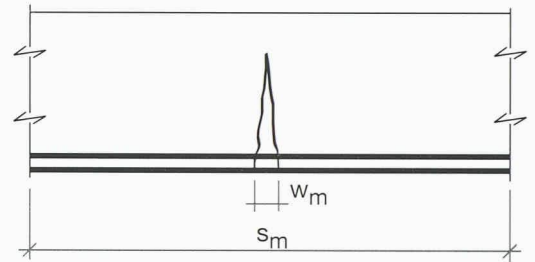


Fig. 5. – Schéma des allongements spécifiques le long d'un élément fissuré

– application de l'équation (12) → ε_c
– introduction de la valeur ε_c dans (6) ou (8) → χ_1
– substitution de la valeur χ_1 dans (13).

Le moment ultime résistant M_u est calculé en résolvant l'équation (2) qui devient, en phase de rupture:

$$M_u = A_L f_{Lu} (h - \chi_2 x) + A_S f_{ys} (d - \chi_2 x) \quad (14)$$

où la contribution de la lamelle est introduite du côté de la résistance au même titre que l'acier d'armature.

A ce stade du calcul où tous les paramètres sont connus, il est impératif de vérifier si le mode de rupture déterminant respecte les conditions aux limites, soit:

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$$

$$\varepsilon_{ys} \leq \varepsilon_{Smax} = \frac{\varepsilon_S}{\kappa_S} \leq \varepsilon_{yu}$$

$$\varepsilon_{Lmax} = \varepsilon_{Lu}$$

Nous avons vu, précédemment, que la ruine peut être entraînée par des contraintes de cisaillement trop importantes au droit de l'interface support-mortier adhésif.

Un modèle de calcul linéaire décrivant la distribution des contraintes de cisaillement en fonction de

la distance du point d'application d'une force a été établi par Bresson [4] (fig. 6). Etant donné une longueur d'ancrage l_a et une force appliquée F_L , l'équation différentielle de la contrainte tangentielle τ dans le collage est de la forme:

$$\tau(x) = F_L \cdot \omega \cdot \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{\sinh(\omega \cdot l_a)} \quad \text{avec}$$

$$\omega^2 = \frac{G_{EP}}{d} \left[\frac{1}{E_L \cdot t_L} + \frac{1}{E_c \cdot h} \right] \quad (15)$$

Ce modèle admet l'hypothèse qu'une liaison parfaite est réalisée entre la lamelle et le support en béton. Dès que la contrainte tangentielle atteint une valeur limite τ_{cr} , des désordres se produisent. Le comportement est alors modifié et une zone non linéaire se développe (fig. 7). L'analyse mathématique du comportement non linéaire a été décrite par Kaiser [5]. Sur la base de nombreux essais, la valeur limite τ_{cr} , au-delà de laquelle un comportement non linéaire se produit, est comprise entre 5 et 12 N/mm².

Procédure de dimensionnement, plan de sécurité

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode de calcul permettant le dimensionnement d'un renforcement d'élément structural de manière à garantir la sécurité à la rupture et l'aptitude au service.

Tels qu'ils ont été développés ci-dessus, les modèles de calcul se basent sur les principes régissant un projet conventionnel, notamment dans l'application des normes SIA. Il est cependant nécessaire d'introduire quelques règles complémentaires, qui tiennent compte des caractéristiques particulières de la technique et des matériaux mis en œuvre. Le concept essentiel est la définition de la sécurité et son corollaire, l'identification des situations à risques.

La technique de renforcement par collage nécessite un savoir-faire et une connaissance approfondie des matériaux et de leur procédure de mise en œuvre: si, en effet, des projets conventionnels permettent la correction ultérieure d'un certain nombre d'erreurs, ce ne sera que difficilement le cas dans ce type d'exécution. Une mauvaise préparation des produits, un environnement défavorable ou des erreurs durant la phase de projet, d'exécution ou d'utilisation sont quelques-unes des causes pouvant réduire ou annuler l'effet du renforcement.

Ayant déjà abordé, plus haut, l'influence de la température sur le comportement des matériaux (fig. 2), nous avons vu qu'il était primordial de s'assurer que la température ambiante ne puisse en aucune circonstance avoisiner la température de verre T_G . Il est donc de première importance de

se prémunir contre le feu ou contre une irradiation solaire élevée.

La nature hétérogène des lamelles en fibres de carbone implique qu'elles présentent des caractéristiques mécaniques différentes selon la direction considérée. Aussi, un impact dans un plan perpendiculaire à celui des fibres peut-il avoir des conséquences importantes et un soin particulier doit être apporté à la manutention des lamelles, qui doivent en outre être protégées contre les chocs accidentels.

Lorsque les sollicitations agissant sur une structure en béton armé atteignent des valeurs proches des conditions ultimes en flexion, on voit apparaître des signes annonciateurs de rupture, telles que fissurations excessives ou déformations importantes. Dans le cas d'un renforcement avec des lamelles en fibres de carbone, il est important de garder à l'esprit que celles-ci ne possèdent aucune réserve de déformation plastique.

Il est enfin nécessaire d'apporter quelques conditions limitatives supplémentaires tenant compte des situations de risque spécifiques à ce genre de prestations.

Un principe qui devrait s'appliquer à tous les renforcements par collage consiste à dire que: *l'élément non renforcé, soumis aux sollicitations nouvelles, c'est-à-dire, celles qui pourront agir sur l'élément renforcé, doit garantir une sécurité structurale*. En d'autres termes, on considère que la défaillance totale du système de renforcement ne doit pas entraîner la ruine de la structure sous l'effet des charges augmentées pour lesquelles le renforcement a dû être dimensionné. En considérant le mode de rupture déterminant, il est raisonnable d'admettre un coefficient global γ_G équivalent à 1,2. De ce principe, il découle que l'efficacité du renforcement ne devrait pas excéder 50% de la résistance initiale.

Sur la base de l'approche analytique présentée au chapitre précédent, on peut déduire que la résistance théorique maximale en flexion est atteinte lorsqu'il y a rupture de la lamelle pendant que les aciers se plastifient et ce, sans que l'écrasement du béton ait lieu. Afin de prévenir une fissuration excessive, qui pourrait notamment entraîner la rupture précoce du système par décollement de la lamelle, il est raisonnable de limiter la contrainte dans les aciers sous charges de service à une valeur inférieure à leur limite d'écoulement. Cela peut être exprimé par le principe suivant: *aucune déformation plastique ne doit apparaître dans les aciers d'armature à l'état de service*.

Réalisations, perspectives

Plusieurs types de matériaux composites tels que les fibres de verre, d'aramides ou de carbone sont susceptibles d'être utilisés dans de nombreuses

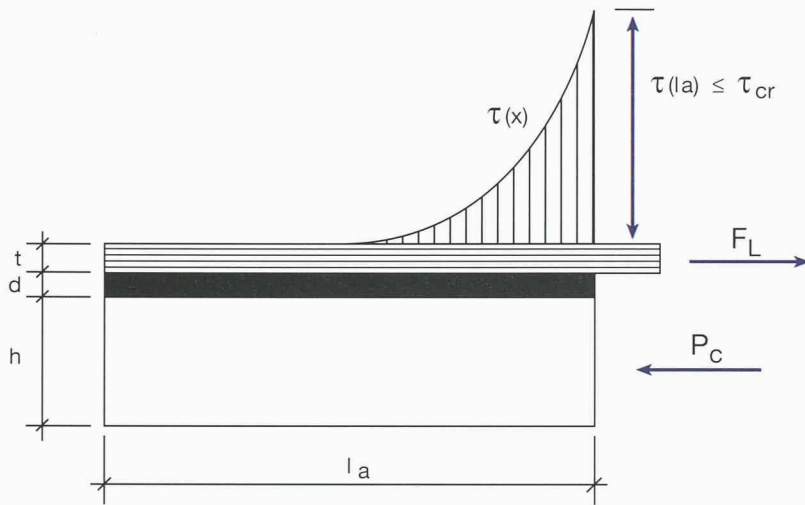


Fig. 6. – Distribution des contraintes de cisailement dans un mortier adhésif

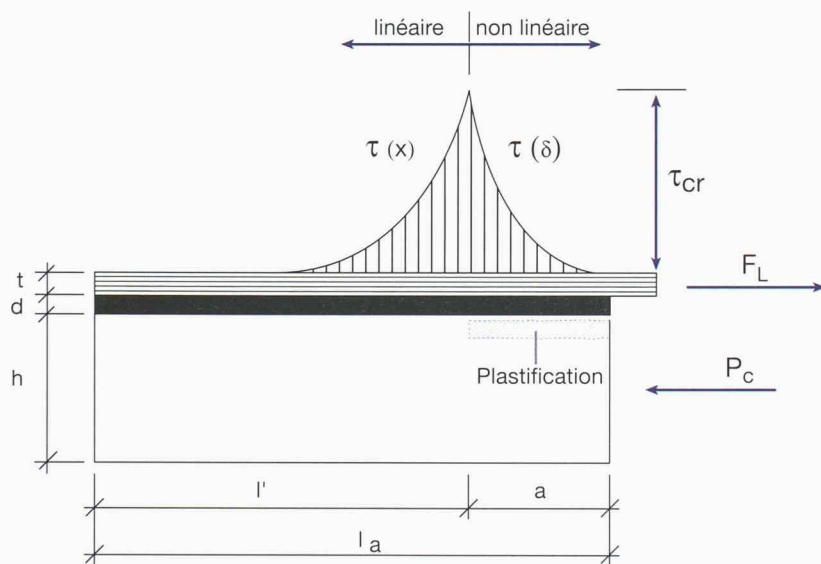


Fig. 7. – Etats linéaire et non linéaire de la zone d'ancrage

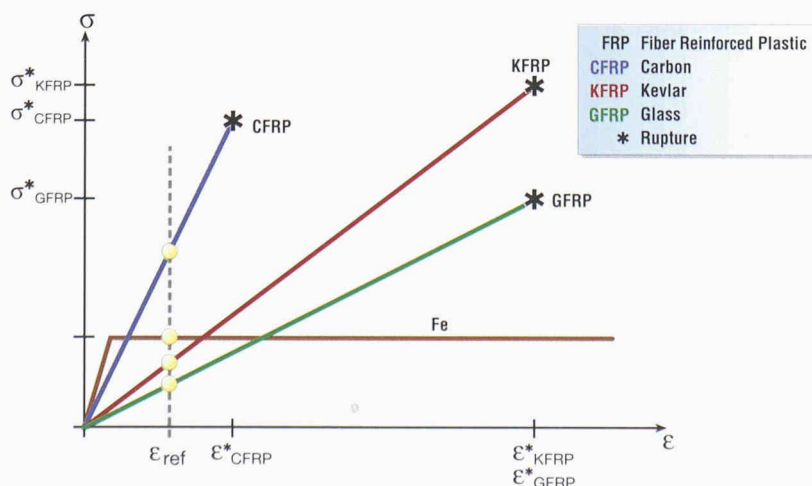


Fig. 8. – Diagrammes contrainte-déformation représentatifs comparés de l'acier et des matériaux composites

applications de la construction [6]. Pour le renforcement de structures par collage, les caractéristiques spécifiques propres à chacun de ces matériaux, ainsi que des critères d'aptitude au service donnent une préférence à l'usage de fibres de carbone. Comme nous l'avons précisé à la fin du chapitre précédent, pour des questions de sécurité ou de durabilité, les contraintes dans l'acier, et par conséquent l'ouverture des fissures, doivent être limitées: ces conditions peuvent être vérifiées en limitant les déformations spécifiques dans les aciers d'armature à une valeur de référence ϵ_{ref} . Le choix d'un matériau composite, caractérisé par un module d'élasticité élevé, permet ainsi d'optimiser la contribution du matériau de renforcement comme le suggère la figure 8.

C'est en 1991, qu'a eu lieu la première application mondiale de cette technique au pont sur l'Ibach, à Emmenbrücke près de Lucerne. En 1992, deux traverses du pont historique en bois près de Sins (AG) furent raidies au moyen de lamelles en fibres de carbone [7]. Depuis lors, ce type de renforcement fut exécuté avec succès sur un certain nombre d'ouvrages tels que la mairie de Gossau (SG), la Migros Steinacker à Uzwil (SG), un parking à Flims (GR) ou La Placette à Monthey (VS). D'autres modes d'application font l'objet de travaux de recherche, notamment au Massachusetts Institute of Technology (USA) et au LFEM/EMPA. Souvent, l'amélioration en flexion se trouve limitée par une résistance à l'effort tranchant devenue déterminante; or l'étude d'une nouvelle méthode de renforcement à l'effort tranchant, menée sur des structures en béton armé au moyen de lamelles en matériaux composites, a permis de démontrer l'efficacité et la fiabilité de cette technique novatrice [8]. D'autres travaux ont confirmé l'avantage pouvant être apporté par le collage de lamelles initialement précontraintes [3], [9], [10]. En tension, ces dernières ont notamment un effet bénéfique sur l'aptitude au service, en réduisant l'ouverture des fissures et en diminuant les déformations.

Les programmes de recherche actuels doivent toutefois encore fournir de précieuses informations, avant que l'on puisse appliquer des lamelles en tension ou mettre en place un renforcement à l'effort tranchant. Ils doivent aussi permettre de déterminer le comportement à long terme de ces techniques et de fixer les paramètres de projets.

Conclusion

Les nombreuses applications d'armatures collées ont démontré l'efficacité de cette technique. Depuis une dizaine d'années, les travaux de recherche menés notamment au LFEM/EMPA et au MIT nous permettent de disposer d'une nouvelle méthode de renforcement au moyen de lamelles

en fibres de carbone collées extérieurement.

Les connaissances que nous avons actuellement des matériaux composites sont importantes et proviennent des nombreuses études réalisées dans les domaines aéronautique et aéronaval. L'expérimentation a confirmé les caractéristiques exceptionnelles de ces matériaux, dont les principaux avantages résident dans une résistance à la traction et à la fatigue très élevée, un poids volumique minime et un excellent comportement dans des environnements corrosifs ou électromagnétiques.

Le coût encore très élevé de ce type de matériau ne représente pas un handicap déterminant si l'on considère certains facteurs. Le montant imputable aux matériaux pour ce genre de prestations correspond à environ 20% du coût global, dont les 80% restants couvrent les frais de main-d'œuvre. La plus grande facilité de mise en œuvre de ce système permet de réduire sensiblement le coût de la main-d'œuvre, tandis que les qualités intrinsèques du carbone autorisent à diminuer la quantité de matériau requis. Ainsi, pour la réparation du pont sur l'Ibach, 6,2 kg de lamelles en fibres de carbone ont suffi, alors que le même renforcement réalisé de manière traditionnelle, soit en acier, aurait nécessité 175 kg de ce matériau.

Aux Etats-Unis, des études ont montré que plus d'un demi-million de ponts du réseau autoroutier présentent des déficiences structurales, et des experts en ont identifié 416 menaçant la sécurité publique dans la seule ville de New York [11]. De nombreux pays, confrontés au même type de problèmes, étudient la possibilité de recourir aux matériaux composites et un certain nombre d'ouvrages ou parties d'ouvrages ont déjà été réalisés avec de tels matériaux [6].

En regard des montants exceptionnels qui doivent être investis afin de maintenir ou de réhabiliter l'ensemble de nos bâtiments ou ouvrages d'art, il devient de première importance de faire appel à

des techniques ou à des matériaux pouvant prétendre augmenter l'espérance de vie de ces infrastructures. Il est certain que les matériaux composites apportent un élément de réponse à ce défi relevé par de nombreux pays dans le monde.

Bibliographie

- [1] L'HERMITE R. ET BRESSON J.: «Béton armé par collage d'armatures», Colloque RILEM, UTI, Paris, septembre 1967, Ed. Eyrolles, 1971, vol. II, pp. 175-203, 1967
- [2] Norme SIA 162 «Ouvrages en béton», SIA, Zurich, 1993
- [3] DEURING M.: «Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen», EMPA-Bericht Nr. 224, 1993
- [4] BRESSON J.: «Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures», Béton plaqué, Annales I.T.B. T.P. Nr. 278, Série béton, béton armé, Paris, 1971
- [5] KAISER H.-P.: «Bewehren von Stahlbeton mit kohlenstofffaserverstärkten Epoxidharzen», EPFZ, Diss. ETH Nr. 8918, Zurich, 1989
- [6] MEIER U.: «Carbon Fiber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering», International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, 1992
- [7] MEIER U., DEURING M., MEIER H., SCHWEGLER G.: «Strengthening of Structures with CFRP Laminates: Research and Applications in Switzerland», Advanced composite materials in bridges structures, 1st International Conference, Sherbrooke, Canada, 1992
- [8] BERSET J.-D.: «Strengthening of Reinforced Concrete Beams for Shear using FRP Composites», Massachusetts Institute of Technology, Master Thesis, Cambridge, Massachusetts, USA, 1992
- [9] DESCKOVIC N.: «Innovative Method of Prestressing Structures with Externally Bonded FRP Composites», Massachusetts Institute of Technology, Master Thesis, Cambridge, Massachusetts, USA, 1991
- [10] TRIANTAFILLOU T. C., DESCKOVIC N., DEURING M.: «Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets», *ACI Structural Journal*, May-June 1992, Vol. 89, No. 3, pp. 235-244, 1992
- [11] MIT Innovative Structures Program - «International Research Workshop on Innovative Structures: Materials, Design and Construction for the 21st Century», January 24 and 25, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1991