

## **1 Méthodes et principes généraux de renforcement**

### **1-1 Introduction**

La durée d'exploitation d'un ouvrage en béton armé est à priori comprise entre 50 et 120 ans selon sa composition et sa fonction. Or, de nombreuses pathologies imprévues liées à l'utilisation ou à l'environnement sont susceptibles d'intervenir avant la fin de cette période. Dans ce cas, les réparations et/ou renforcements structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matières (béton projeté et renfort collés). Le renforcement de structures en béton armé par ajout d'armatures externes est le procédé qui nous intéresse dans cette étude, et plus particulièrement le renforcement par composites.

### **1-2 Les méthodes de réparation structurale**

#### **1-2-1 Réparation par béton projeté**

Cette technique de réparation était très couramment employée car particulièrement bien adaptée à la réfection des voûtes et tunnels ou des murs en béton armé. Elle permet de réaliser aussi bien des réparations superficielles, comme la réfection d'un parement en béton présentant de légères épaufures, que des réparations ou des renforcements de structures, en disposant de nouvelles armatures à la structure. Dans ce cas, le béton reconstitue non seulement la géométrie de la construction mais aussi, il joue également le rôle confié au béton dans l'association acier / béton armé. Les étapes importantes avant la projection du béton sont la mise en état du support (sablage, brossage des armatures,...), la mise en disposition et l'ancrage des armatures ajoutées et enfin la mise en place des coffrages.

#### **1-2-2 Réparation par précontrainte additionnelle**

Cette technique est particulièrement adaptée pour réparer des poutres dont la résistance à la flexion ou à l'effort tranchant est insuffisante par l'emploi d'étriers actifs. Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre d'après Cusin (1992). En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi, des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. En fin, il faut prendre toutes les dispositions pour contrôler

que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées.

### **1-2-3 Renforcement par collage de plats métalliques**

La technique du collage acier – béton s’est développée au début des années soixante suite à l’apparition sur le marché de colles de type résines époxyde possédant des caractéristiques d’adhésion élevée et susceptibles de transmettre des efforts non négligeables. C’est dès 1962 que Lerchenthal (1967) en Israël a proposé de remplacer les armatures conventionnelles par des plaques d’acier collées en sous face. Mais, c’est à Durban (Afrique du Sud) que le premier cas d’utilisation de cette technique, suite à l’omission accidentelle des aciers des poutres, est répertorié en 1964. En France, cette technique a été étudiée par l’Hermite (1967) et Bresson (1971) afin d’assurer la réparation et le renforcement de structures en béton armé présentant des insuffisances à la flexion. Ils ont étudié le phénomène parallèlement en laboratoire et in situ. C’est entre 1970 et 1976 que cette technique connut un certain succès. En effet, plusieurs ouvrages en béton armé et en béton précontraint furent alors renforcés en France. Au Japon, 240 ponts présentant une capacité portante insuffisante ont été renforcés par cette technique vers 1975 (David (1999)).

En France, au laboratoire des ponts et chaussées, les études conduites par Theillout ont donné des informations importantes sur le fonctionnement de ce type de renforcement (Theillout (1983)).

### **1-2-4 Renforcement par collage de plats composites**

Lors de ces dernières années, le renforcement par tôles d’acier a été remplacé par le renforcement par matériaux composites. La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone – époxyde ou verre – époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l’acier, principalement la résistance à la traction et en compression (Garden et al. (1997)). Les avantages de l’utilisation de composites sont nombreux. On peut citer par exemple leur grande résistance à la fatigue, leur orientation (Saadatmanesh et al. (1991) et Meier et al. (1992)). Dès lors, les études sur l’utilisation de matériaux composites pour la réhabilitation se sont multipliées pour mieux comprendre les problèmes posés par cette nouvelle technique (Assih (1998), Ferrier (1999), Avril (2002) et Sierra Ruiz (2002)) par exemple.

### **1-3 Matériaux de renforcement**

Le renforcement fait intervenir deux nouveaux composants qui sont la colle et le renfort. Une grande variété de matériaux est disponible selon les besoins. Les plus couramment utilisés sont brièvement résumés ci-dessous :

#### **1-3-1 Composite**

Les matériaux composites utilisés ici sont constitués de fibres longues noyées dans une matrice époxyde. Ce sont les fibres qui fournissent à l'ensemble les caractéristiques mécaniques principales. La matrice a quant à elle pour fonction essentielle de conserver la disposition géométrique du renfort. Elle participe également à la répartition des contraintes au sein du composite et protège les fibres des agressions chimiques. Les fibres les plus courantes sont le verre, l'aramide et le carbone.

Les matériaux composites se sont développés au début des années 40 avec l'industrie aéronautique. L'anisotropie et l'hétérogénéité marquées de ces matériaux rendent le dimensionnement des pièces composites complexe.

De nombreux essais s'avèrent donc souvent nécessaires avant d'obtenir un dimensionnement satisfaisant (Taljsten (1994)).

Les trois fibres sont utilisées dans les structures de génie civil, mais pour le renforcement, les composites à fibres de carbone se sont imposés grâce à ses caractéristiques mécaniques. En effet, le surcoût important à l'achat du renfort est compensé par les économies de main d'œuvre qu'il permet. En effet, ce poste représente environ 80% du coût d'une intervention, les 20 % restant correspondant au prix d'achat des matériaux.

Un autre avantage considérable des matériaux composites est la grande souplesse d'utilisation, puisque les taux de fibres, leur structure, leur orientation et le nombre de plis sont ajustables. Le caractère directionnel des renforts induit de fait une anisotropie des propriétés mécaniques. On obtient ainsi, suivant la direction et le type de composite, des modules longitudinaux compris entre 10 et 200 GPa et une résistance variant entre 100 et plus de 1000 MPa.

Pour le renforcement, deux types de produits sont principalement disponibles. Les premiers sont des plaques en composite unidirectionnel, qui se collent sur le support béton avec une colle adaptée (SIKADUR par exemple Sika Carbodur (2000)). Les seconds sont des tissus qui

s'imprègnent in situ avec une résine. Cette résine fait office de colle et de matrice (procédé SIKAWAP par exemple Sika Carbodur (2000)).

### **1-3-2 Colles et résines époxydes**

Les résines époxydes sont des polymères. Elles présentent des propriétés mécaniques et thermiques variées. Un durcisseur mélangé à la résine provoque la polymérisation. Ce processus est irréversible et sa vitesse dépend de la température. Plus la température est élevée, plus le processus est rapide.

Ce type de colle possède un retrait négligeable et une excellente adhésion avec divers supports tels que le bois ou le béton. Sa résistance aux agressions chimiques est globalement satisfaisante.

Deux durées importantes caractérisent les colles époxydes : la durée de vie en pot et la durée de vie du mélange. La première fait référence au temps durant le quel la colle peut être stockée sans perdre ses propriétés. La deuxième est le délai dont on dispose entre le moment où l'on réalise le mélange et celui où le phénomène de durcissement commence.

## **1-4 Etude sur le comportement de structures réparées par composites**

Quelques exemples typiques de travaux issus de la littérature sont présentés dans ce qui suit. Ces travaux permettent de mieux comprendre le comportement d'ensemble de structures ou renforcées. Le type de sollicitation généralement utilisé est la flexion trois ou quatre points.

### **1-4-1 Essais de flexion sur poutres renforcées**

La configuration d'essais réalisée le plus souvent est la flexion trois ou quatre points car elle se rapproche le plus de la réalité. En effet, les renforts sont collés généralement en sous face d'éléments de structure en béton fléchis.

Les paramètres les plus examinés sont le type de renfort, le type de colle, l'orientation des fibres et le type d'ancrage utilisé.

Les principales conclusions de ces études sont les suivantes :

- l'augmentation de la quantité de renfort influe directement sur le type de rupture. Elle a tendance à augmenter de manière significative le moment ultime. Ainsi, une poutre avec une quantité de renfort plus faible qu'une autre présente une rupture au caractère fragile plus marqué (Ahmed (2001)) ;

- L'augmentation de la longueur du renfort augmente la force ultime et diminue l'inclinaison des fissures (Nguyen (2001)) ;
- La géométrie de la poutre joue un rôle sur l'efficacité du renfort. Une section rectangulaire avec axe principal vertical a une réponse globalement meilleure qu'une section carrée (Arduini (1997)) ;
- L'adhérence entre le renfort et le béton a une influence sur la charge à la rupture (De Lorenzis (2001)) ;
- Le type d'ancrage permet généralement d'augmenter la force à la rupture mais surtout il rend la structure plus ductile (David (1999), Garden et al. (1997) et Hussain (1995));
- La forme de l'extrémité du renfort permet également d'améliorer le comportement de la structure. Ainsi, un renfort aminci à l'extrémité apporte un meilleur comportement qu'une extrémité rectangulaire (Johnson et al. (1981) et Etman et al. (2000));

Assih (1998) a étudié l'influence des différents paramètres tels que l'épaisseur du composite, l'épaisseur du joint de colle, la longueur du renfort sur la résistance ultime de rupture de poutre en béton armé renforcée. Ainsi, une valeur optimale de l'épaisseur du composite a été trouvée égale à 1,4 mm.

Les trois types de rupture relevées pour ces poutres sont :

- la rupture de la plaque pour de faibles épaisseurs (inférieures ou égales à 0.5 mm) ;
- la rupture en compression du béton ;
- la rupture par cisaillement liée spécialement aux déformations relatives des barres d'acier tendues par rapport au joint de colle et à la plaque.

L'épaisseur du joint de colle conduit quant à lui à une excellente résistance pour des épaisseurs faibles (0.5 à 2 mm). Au-delà de 2 mm, une légère baisse de la charge à la rupture est observée. Cette rupture s'accompagne d'un changement de mode de fissuration. L'étude de la longueur du renfort montre qu'une bonne tenue mécanique est obtenue pour une longueur de la plaque supérieure à 71% de la distance entre appuis.

#### **1-4-2 Les divers modes de ruine**

De nombreux chercheurs se sont attachés à mieux comprendre le comportement de structures renforcées ou réparées par composites. Il en ressort que le collage de plaques apporte aux structures une rigidité supplémentaire et généralement une charge ultime de rupture plus importante. En effet, les déformations de traction dans le béton sont réduites et l'apparition de

la fissuration est retardée par la présence de ces renforts. Cependant, ces diverses études ont mis en évidence de nouveaux comportements vis-à-vis de la rupture. En effet, celle-ci est susceptible de se produire soudainement, conférant alors un comportement fragile peu sécurisant à ces structures (Saadatmannesh et al. (1990), Ritchie et al. (1991), Garden et al. (1997) et Buyukozturk et al. (1998)) par exemple.

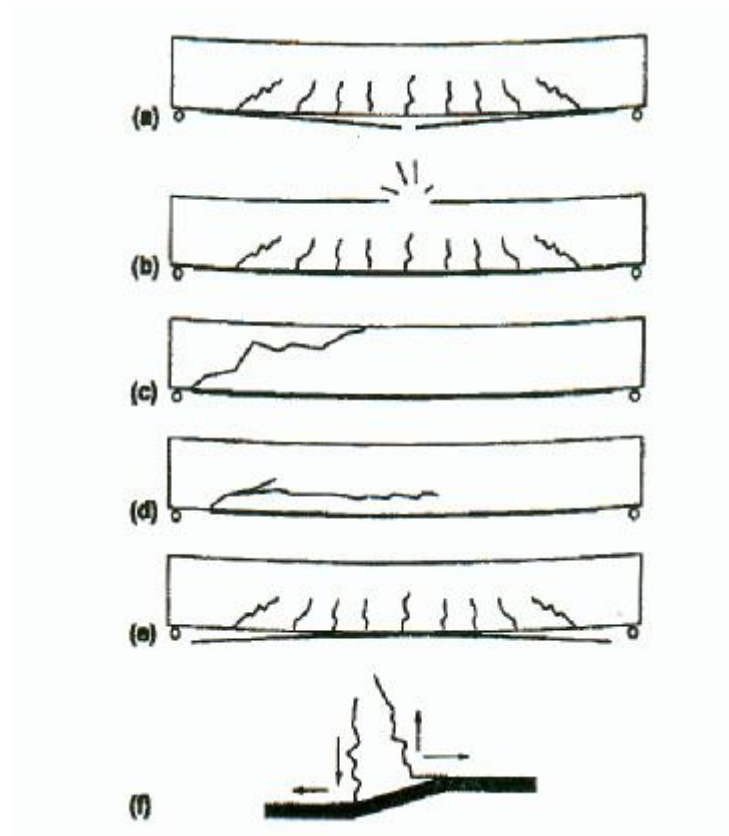
Triantafillou et al (1992) ont étudié l'influence de renforts composites sur les mécanismes de rupture de poutres en béton armé renforcées sollicitées en flexion. Les mécanismes de rupture relevés sont :

- la plastification des aciers et rupture du renfort ;
- la plastification des aciers et écrasement du béton ;
- la rupture par compression ;
- le décollement du renfort.

Ils ont ainsi proposé un diagramme permettant de prévoir en fonction du chargement et de la quantité de renfort le mode de rupture prédominant.

De même Buyukozturk et al. (1998) ont regroupé les différents modes de rupture observés et les ont regroupés en six catégories distinctes. Ils sont modélisés sur la figure II.1. Ces modes :

- la plastification des aciers et rupture du renfort (schéma **a**) ;
- la rupture par compression du béton (schéma **b**) ;
- la rupture par cisaillement (schéma **c**) ;
- la rupture par peeling-off (schéma **d**) ;
- le délaminage du renfort composite (schéma **e**) ;
- le décollement du aux fissures de cisaillement (schéma **f**).



**Figure1:** Différents modes de rupture des poutres renforcées