

## Documents scientifiques et techniques

# Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites

## Recommandations provisoires

Février 2011





### *Préambule*

*La présente édition des recommandations établies par le groupe de travail «Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites» correspond à une actualisation du document initial publié en 2003 et révisé en 2007. Il est notamment élargi au renforcement des dalles béton-armé soumises au poinçonnement, au confinement et au renforcement des poteaux et colonnes en compression simple et il aborde les premiers éléments de vérification à prendre en considération dans le cas du renforcement de structures précontraintes par des armatures composites passives additionnelles. Cette nouvelle édition a également fait l'objet d'une mise en conformité avec les Eurocodes.*

*Le groupe de travail poursuivra son action d'expertise, d'analyse et de réflexion vis-à-vis du renforcement parasismique en 2011.*

*Pour contribuer à l'amélioration de ce référentiel, je recommande à tous les utilisateurs de faire parvenir auprès du secrétariat technique des éventuelles remarques ou corrections et je renouvelle mon souhait de voir participer aux travaux de commission tous les acteurs motivés pour le développement de ces nouvelles technologies de construction.*

*Patrice HAMELIN*

## SOMMAIRE

<i>Chapitre I :</i>	<i>9</i>
<i>Recommandations concernant la caractérisation des matériaux composites utilisés pour la réparation des structures en béton</i>	
<i>Chapitre II :</i>	<i>40</i>
<i>Recommandations concernant les méthodes de calcul applicables aux éléments structuraux réparés et renforcés par composites</i>	
<i>Chapitre III :</i>	<i>96</i>
<i>Recommandations concernant la mise en œuvre in situ des matériaux composites pour le renforcement</i>	
<i>Chapitre IV :</i>	<i>112</i>
<i>Recommandations concernant le contrôle in situ des matériaux composites pour le renforcement</i>	
<i>Synthèse du groupe de travail</i>	<i>120</i>
<i>Axes de recherche à soutenir</i>	<i>122</i>
<i>Annexes :</i>	<i>123</i>
<i>1. Lexique – Glossaire</i>	
<i>2. Caractéristiques techniques des différents produits industriels</i>	
<i>Notion de "KIT"</i>	
<i>3. Applications industrielles – Evolutions</i>	
<i>4. Références bibliographique</i>	

## **1. *PREAMBULE***

### **1.1 *Qu'est-ce qu'un groupe de travail de l'AFGC ?***

La création d'un groupe de travail de l'AFGC répond en général à un problème technique dans un domaine où il est utile de se positionner par rapport à l'état des connaissances et pratiques internationales et de faire émerger une position nationale.

Un groupe est créé pour une durée déterminée. Cependant, pour des actions de caractère pérenne, on peut également créer des comités.

L'objectif d'un groupe est de produire un document de consensus pour la communauté française du génie civil et d'en valoriser le contenu technique.

### **1.2 *Pourquoi cette charte ?***

L'utilité de cette "charte" est double : elle constitue un aide-mémoire des procédures, pour l'animateur et les membres du groupe, dans le souci de favoriser un travail de qualité ; par les principes qu'elle expose, elle tient lieu de "contrat" entre l'Association et le Groupe de Travail.

## **2. *CREATION D'UN GROUPE DE TRAVAIL***

### **2.1 *Fiche de proposition***

La "fiche de proposition", dont l'établissement précède la création d'un groupe de travail et qui est étudiée par le Comité Scientifique et Technique comporte les rubriques suivantes :

- Titre
- Contexte national et international
- Objectif
- Composition pressentie du Groupe de travail (assurant sa représentativité)
- Produits attendus
- Calendrier
- Auteur de la proposition.

Tout membre de l'Association peut prendre l'initiative de préparer une telle fiche en vue de la création d'un groupe. Un modèle de "fiche de proposition", disponible au secrétariat de l'AFGC, sera systématiquement envoyé à l'animateur au moment de la création du groupe.

### **2.2 *Composition du groupe***

La composition du groupe doit assurer une représentativité vis-à-vis de l'Association et de ses composantes. Elle doit également assurer une bonne représentativité technique, dans le souci d'associer toutes les compétences reconnues et les plus actuelles dans le domaine.

Pendant six mois après l'approbation par le Comité Scientifique et Technique (cf. ci-après), la composition du groupe reste ouverte : l'animateur a le devoir d'examiner toutes les demandes de participation au groupe. Au-delà, pour un fonctionnement cohérent du groupe, il est souhaitable que la liste des membres actifs soit arrêtée. Le groupe peut néanmoins élargir sa composition par la suite en tant que besoin, notamment en invitant, au cas par cas, des experts pour des questions techniques particulières. En tout état de cause, la composition effective du groupe doit être clairement tenue à jour (notamment dans la fiche de suivi, voir paragraphe 5).

### ***2.3 Approbation par le Comité Scientifique et Technique***

Après instruction appropriée au sein du Comité Scientifique et Technique, la création du groupe de travail est prononcée en séance plénière par le Comité Scientifique et Technique qui désigne l'animateur du groupe, entérine la fiche de proposition et la composition provisoire du Groupe de travail, fait éventuellement des observations ou suggestions d'améliorations et avertit (par une publicité dans la lettre de l'AFGC) l'ensemble des membres de l'Association de la création, de ce nouveau groupe. La fiche de proposition devient alors la fiche de création du groupe et constitue en quelque sorte l'acte d'engagement entre l'Association, le groupe et son animateur.

## **3. ROLE DE L'ANIMATEUR**

### ***3.1 Représentation***

Pour toutes les questions relevant du domaine scientifique et technique de son groupe, l'animateur a vocation pour représenter l'AFGC, par exemple lors de présentations, contacts avec les associations internationales, etc... Cette fonction de représentation doit être exercée en conscience en respectant les règles du paragraphe 4, en informant le Comité Scientifique et Technique et en saisissant ce comité chaque fois que nécessaire, en particulier dans la perspective de tout événement susceptible d'engager l'Association au-delà du fonctionnement normal du groupe. Si un correspondant du Comité Scientifique et Technique n'est pas nommément désigné, les contacts sont à prendre avec le président ou le vice-président de ce comité.

### ***3.2 Animation***

L'animateur anime le groupe dans un esprit d'ouverture et de rigueur. Il doit notamment s'efforcer de respecter l'échéancier prévu dans la fiche de création et réunir son groupe au moins deux fois par an. Il doit avant tout chercher à établir un consensus technique entre les membres du groupe. En cas de difficulté persistante, il fait appel au Comité Scientifique et Technique.

Il s'engage avec son groupe à organiser une veille technique dans son domaine, de façon à disposer, pour les travaux du Groupe de travail, des connaissances les plus actuelles.

Il s'engage à organiser son groupe de façon à livrer en temps voulu le produit prévu, il peut par exemple s'associer avec un co-animateur, s'adjoindre un secrétaire technique, créer des sous-groupes, etc... Il doit utiliser toutes les possibilités de l'AFGC, en tant qu'association, pour atteindre les objectifs du groupe. Il s'oblige à informer le Comité Scientifique et Technique du fonctionnement de son groupe, notamment si possible sans attendre des difficultés.

## **4. ROLE DES MEMBRES DU GROUPE**

### ***4.1 Reconnaissance mutuelle***

C'est l'ensemble des membres actifs du groupe (ou des sous-groupes) qui signe la production. Ceci s'applique tant aux documents écrits qu'aux présentations orales des travaux du groupe, qui font apparaître comme auteurs l'ensemble des membres actifs.

Chacun a donc le droit d'exprimer son point de vue et le devoir d'écouter les autres membres.

On est membre d'un groupe à titre personnel, pour ses compétences scientifiques et techniques. La précision de l'appartenance professionnelle intervient seulement pour désigner, à priori, le domaine de compétence. La présentation de la composition d'un groupe reflète cet état d'esprit.

### ***4.2 Déontologie***

Les membres s'obligent à une confidentialité concernant les informations, résultats et travaux apportés par chacun en vue de l'élaboration du produit du groupe.

Les membres ont un devoir de réserve concernant les travaux et conclusions provisoires du groupe avant leur validation.

## **5. COMMUNICATION**

### ***5.1 Suivi***

Un compte-rendu est à faire à la suite de chaque réunion pour les membres du Groupe de travail, plus une copie pour le président, le vice-président et le secrétaire du Comité Scientifique et Technique.

Le Groupe de travail met également à jour, à chacune de ses réunions à l'initiative de l'animateur ou d'un secrétaire du groupe, une "fiche de suivi" comportant les rubriques suivantes :

- rappel de l'intitulé du groupe et extrait de la fiche de création ; objectif, produits attendus, calendrier ;
- composition (à jour) du groupe de travail (animateur et liste des membres avec coordonnées) ;
- point d'avancement : (date de la mise à jour, date et travaux de la dernière réunion, situation par rapport au programme, difficultés rencontrées) ;
- diffusion de la fiche ( à la charge de l'animateur – destinataires : les membres du groupe de travail, le président, le vice-président et le secrétaire du Comité Scientifique et Technique, les membres du Comité Scientifique et Technique qui en auront fait la demande, éventuellement d'autres personnes, à l'initiative de l'animateur, pourvu qu'elles soient nommément désignées).

Cette fiche doit être un outil de travail pour l'animateur du groupe et pour le Comité Scientifique et Technique, afin de détecter à temps les difficultés d'un groupe, ou prendre en charge à temps la demande de valorisation des travaux d'un groupe de travail. Son verso libre peut également être utilisé par exemple pour indiquer : l'état d'avancement depuis la dernière réunion, le programme de travail d'ici la prochaine réunion et la date de la prochaine réunion, les éventuels ajustements du calendrier et des objectifs du groupe.

## **5.2 Méthode**

La communication doit se faire entre le groupe de travail et le Comité Scientifique et Technique, dans les deux sens et chaque fois que nécessaire :

- soit à l'initiative de l'animateur, qui peut saisir le Comité Scientifique et Technique d'une question précise ou d'un problème à résoudre : à moins qu'un correspondant ne soit nommément désigné, il suffit de contacter le président ou le vice-président du Comité Scientifique et Technique ;
- soit à l'initiative du Comité Scientifique et Technique qui peut déléguer un de ses membres pour s'informer de la bonne marche du groupe et l'aider dans ses difficultés éventuelles ;
- soit à l'initiative de l'animateur ou du Comité Scientifique et Technique, pour faire un exposé d'étape devant le Comité Scientifique et Technique, ou pour l'organisation d'ateliers, de journées d'étude, de contacts formels avec des interlocuteurs étrangers, plus généralement pour la préparation d'un événement touchant l'ensemble de l'Association et la communauté scientifique et technique.

## **5.3 Appui**

S'étant assuré du bon fonctionnement d'un groupe et de l'utilité de ce qu'il envisage, le Comité Scientifique et Technique peut soutenir les demandes de moyens d'un groupe ou de certains de ses membres auprès des instances appropriées, pour la réalisation de travaux ou d'études nécessaires à l'aboutissement de la démarche du groupe de travail : essais croisés permettant de valider des modes opératoires reconnus, par exemple.

# **6. VALIDATION ET VALORISATION DU TRAVAIL DU GROUPE**

## **6.1 Information de l'ensemble de l'Association**

C'est à partir des fiches de suivi et des comptes-rendus de réunion que sont rédigées, à la charge du Comité Scientifique et Technique, les rubriques de la lettre de l'AFGC et du bulletin annuel concernant l'avancement du travail des groupes, sans redemander de l'information aux groupes de travail.

## **6.2 Validation des documents produits**

Le groupe s'engage à produire des documents validés par tous ses membres actifs sur la base du consensus qui a été recherché (cf. paragraphe 3). Lorsque différents points de vue restent inconciliables même après un dialogue technique approfondi, il est souhaitable que le document final explicite ces divergences tout en faisant ressortir les

points d'accord. Le document produit par le groupe est proposé au Comité Scientifique et Technique pour validation (notamment de la qualité éditoriale).

### **6.3 Valorisation des produits**

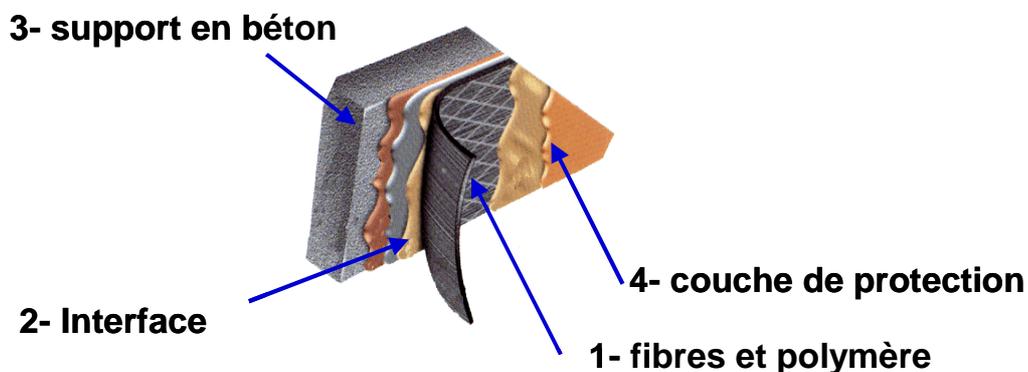
Le groupe doit se structurer dès le départ en vue de la préparation de la publication de ses travaux (saisir du texte, fourniture des illustrations, etc...) et de l'organisation éventuelle de journées techniques de présentation. L'AFGC n'apporte pas d'aide matérielle au fonctionnement du groupe, en revanche, elle aide à la valorisation du produit une fois qu'il est fabriqué.

Pour les documents écrits, la publication se fait – sous réserve de la validation par le Comité Scientifique et Technique – dans le cadre d'une "collection AFGC". Le souci de permettre la présentation des travaux du groupe et la diffusion des documents est intégré dans la préparation des manifestations techniques de l'Association et dans les canaux d'information des membres (lettre de l'AFGC et bulletin annuel).

### **6.4 Contexte technologique dans lequel s'inscrit l'activité du groupe de travail**

En complément des procédés de réparations classiques (béton projeté, béton fibré projeté, collage de plats métalliques, précontrainte additionnelle...) sont apparus, depuis les années 80-90, des techniques de renforcement utilisant le collage de plats composites ou la stratification directe in situ de composites (renfort textile-polymère).

Le principe de la réparation peut être décrit par le schéma ci-dessous où il est possible d'identifier les différents éléments du procédé constructif :



#### *Principe d'une réparation par matériaux composites (Doc. Hankuk Fiber)*

- 1- Le composite : association d'un tissu technique ( en verre, carbone, aramide) avec une matrice (polymère thermodurcissable : résine époxy, résine vinyl-ester).
- 2- L'interface est constituée soit de la colle soit de la résine d'imprégnation du tissu.
- 3- Le substrat correspondant à la couche de béton qui peut être traitée en surface (nettoyage, sablage, couche d'imprégnation, ragréage).

Les principales applications de renforcement, protection, réparation d'infrastructure en béton portent sur le renforcement des poutres vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant, sur le renforcement ou le confinement de colonne en béton.



*Principales applications industrielles (doc SIKA)*

### ***6.5 Objectifs du groupe de travail***

#### ***Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique***

L'objectif de ce groupe est de contribuer au développement de techniques novatrices et de produire des recommandations à caractère consensuel visant à favoriser le développement de ces techniques et à utiliser les composites dans le domaine de la construction. Il est composé de maîtres d'œuvre, maître d'ouvrages, chercheurs universitaires et représentants de laboratoires, de centres techniques, de bureaux d'études, d'entreprises et de producteurs de composites.

Les sujets traités par le groupe ont porté sur :

- l'établissement de recommandations pour la caractérisation des composites ;
- l'établissement de recommandations pour les méthodes de calcul et de dimensionnement des ouvrages béton réparés par composites ;
- l'établissement de recommandations pour la mise en œuvre et le contrôle de la réparation (état d'endommagement des matériaux au sein de la structure, état de surface et traitement de surface du matériau support, conditions d'application, principes technologiques de fixation et d'ancrage) ;
- le contrôle après réparation in situ (contrôle de polymérisation, adhérence sur support, vieillissement in situ, contrôle de l'ouvrage réparé).

### **6.6 Composition du groupe de travail**

**Président du groupe de travail : Patrice Hamelin** (LGCIE, Université Claude Bernard Lyon 1)

**Secrétaire technique du groupe de travail : Emmanuel Ferrier** (LGCIE, Université Claude Bernard Lyon 1)

Participants ayant contribué à l'élaboration du document technique :

Université, Grandes Ecoles

M. Avril	Enmse, St Etienne
M. Berthet	Université de Reims
M. Buyle-Bodin	Université de Lille, Eudil
M. Djelal	Université d'Artois
M. Destrebecq	Université Clermont Ferrand, Lermes
M. Ferrier	Université Lyon 1
M. Grediac	Université Clermont Ferrand, Lermes
M. Hamelin	Université Lyon 1
M. Li	Université de Reims
M. Limam	Insa Lyon
M. Michel	Université Lyon 1
Mme Toussaint	Université Clermont Ferrand, Lermes
M. Vautrin	ENMSaint Etienne

Centres de recherche et d'études techniques

M. Aubagnac	CETE Lyon
M. Benzarti	LCPC
Mme Chauvel	Edf/Septen
M. Chabert	LCPC
M. Chataigner	CETE Lyon
M. Chaussadent	LCPC
Mme Cherver	CETE Méditerranée
M. Clement	LCPC
M. Cope	CSTB
M. Germain	CETE Lyon/DOA
M. Gilbert	Sétra
M. Godart	LCPC
M. Kretz	Sétra
M. Lacombe	Sétra
M. Leconte	CETE Lyon
M. Legeron	Sétra
M. Mailler	IFTH, Ecully
M. Quiertant	LCPC
Melle Sadone	LCPC
M. Touret	Edf/Septen
Mme Vivier	Sétra
M. Trouillet	Metl

Entreprises du bâtiment et des travaux publics

M. Audrac	Bouygues
M. Cousteil	VSL
M. Demilecamps	Vinci Construction France
M. Dugat	Bouygues
M. Doghri	Freyssinet
M. Deschamps	Freyssinet
M. Joly	Sorreba
M. Jorus	VSL
M. Labssita	Vinci Construction France
M. Lacaux	GTM
M. Louchart	Etdindex
M. Loyer	GTM
M. Mercier	Freyssinet
M. Pitance	GTM
M. Simon	Eiffage TP
M. Tourneur	Freyssinet

Entreprises du secteur des composites

M. Dauphin	Hexcel Composites
M. Dallies	Vetrotex
M. Dauriac	Vetrotex
Mme David	Hexcel
M. Gicquel	SIKA
M. Hattab	Fibre Force
M. Luyckx	Soficar
M. Muller	Vetrotex
M. Tardy	Owens Corning
M. Tiberi	Vetrotex

Bureaux d'Etudes, Bureaux de contrôle

M. Colomb	EDS Ouvrages
M. Chenot	Quadric
M. Foure	Cebtp
M. Paille	Socotec

## CHAPITRE I

### RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES UTILISÉS POUR LA RÉPARATION DES STRUCTURES EN BÉTON

1.1.	Natures et méthodes de mise en œuvre de matériaux composites en fonction des différentes technologies de réparation	10
1.2.	Caractéristiques générales usuelles des matériaux composites	10
1.3.	Détermination des caractéristiques des fibres de renfort et des tissus	11
1.4.	Détermination des caractéristiques des matrices polymères et adhésifs	13
1.5.	Détermination du pourcentage volumique de renfort et de matrice polymère constituant le composite	18
1.6.	Recommandations pour la fabrication des plaques stratifiées in situ pour essais mécanique	20
1.7	Détermination des propriétés mécaniques en traction des composites stratifiés in situ	23
1.8	Recommandations pour l'identification des caractéristiques mécaniques des plats pultrudés	25
1.9	Détermination de la tenue au délaminage en flexion du composite à renfort fibre de verre	25
1.10	Détermination de la tenue au délaminage par cisaillement interlaminaire	27
1.11	Détermination des propriétés mécaniques de l'interface composite-béton	28
1.12	Détermination des propriétés d'adhérence du composite sur son support Béton	37

### 1.1 Natures et méthodes de mise en œuvre de matériaux composites en fonction différentes technologies de réparation

Nous considérons essentiellement l'association de matrices thermdurcissables (polyester, vinylester, epoxyde) avec des renforts filamenteux (verre, carbone, aramide).

Nous considérons deux technologies de mise en œuvre des renforts composites :

- le collage de plaques composites ou plats pultrudés après préparation du support béton,
- la stratification directe de tissus unidirectionnels ou bidirectionnels par imprégnation de matrice polymère après préparation du support béton.

L'une et l'autre des deux techniques de renforcement peuvent être complétées par l'application d'une couche de protection vis-à-vis de conditions accidentelles (incendie, choc) ou vis-à-vis du vieillissement (ultra-violet, reprise humidité...).

L'ensemble des procédés proposés par les entreprises fait l'objet de fiches « produits » figurant dans les annexes du chapitre III.

### 1.2 Caractéristiques générales usuelles des matériaux composites

A titre indicatif, les caractéristiques mécaniques des différents composants (fibres, tissus, matrice polymère) et des composites doivent être recensées dans les tableaux ci-dessous en précisant les références du producteur.

<i>Tableau 1. Caractéristiques de la colle ou de la résine d'interface composite-béton</i>														
Nature	Référence du produit	DPU	Viscosité	Traction			Coefficient de dilatation thermique mm/m/C°	Cisaillement (MPa)		Compression		Température de transition vitreuse T <sub>v</sub> (°C)	Densité	Dureté shore
				Module d'Young E <sub>ad</sub> (MPa)	Allong. Rupture %	Résistance f <sub>ad</sub> (MPa)		Module G <sub>ad</sub> (MPa)	Résistance τ <sub>ad</sub> (MPa)	Module d'Young E <sub>ad, c</sub> (MPa)	Résistance f <sub>ad, c</sub> (MPa)			

*Tableau 2. Caractéristiques des fibres et tissus*

Nature	Orientation des fibres ou type d'armure	Densité	Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )	Module d'Young E (GPa)	Résistance R (MPa)	Allongement à la rupture $\epsilon_u$ (%)	Dilatation (mm/m/°C)	Tissu	
								% fibre chaîne	% fibre trame

*Tableau 3. Caractéristiques des composites*

Nature	Référence du produit	Fibres utilisées	Nature de résine utilisée et valeur de $T_g$	Viscosité	DPU	Procédé de mise en oeuvre	Densité	Résine $V_R$	Fibres $V_F$	% volumique	Epaisseur d'une couche (mm)	Module d'Young $E_f$ (GPa)	Résistance $f_u$ (MPa)	Module de cisaillement plan $G_f$ (MPa)	Résistance au cisaillement plan $\tau_{ad}$ (MPa)	Coefficient de Poisson $\nu$	Dilatation longitudinale (mm/m/°C)	Allongement à la rupture $\epsilon_{fu}$ (%)	Dureté shore
--------	----------------------	------------------	--	-----------	-----	---------------------------	---------	--------------	--------------	-------------	-----------------------------	----------------------------	------------------------	---	---	------------------------------	------------------------------------	--	--------------

### **1.3 Détermination des caractéristiques des fibres de renfort et des tissus**

#### **1.3.1 Cas des fibres textiles**

D'un point de vue général, la détermination de la force de rupture et de l'allongement de rupture des fibres individuelles est fait suivant la norme NF EN ISO 5079.

La courbe moyenne type force-allongement sur fibre individuelle conduite à partir de 50 essais à des vitesses de sollicitations permettant d'atteindre 50 % de l'allongement par minute pour des fibres ayant un allongement moyen à rupture inférieur à 8 % correspond au diagramme ci-dessous.

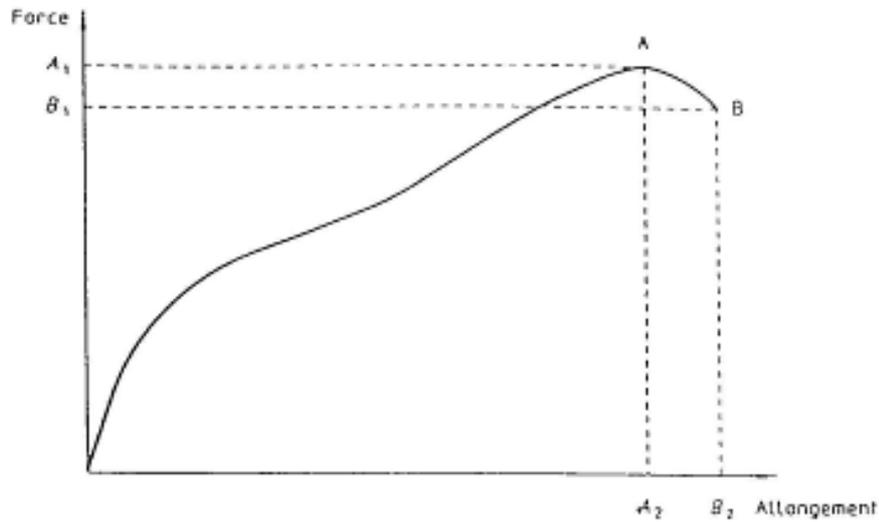


Figure 1.3.1. Courbe type force-allongement (extrait NF EN ISO 5079)

### 1.3.2 Recommandations vis-à-vis des fibres de carbone

Dans le cas particulier des fibres de carbone, l'évaluation des caractéristiques des fibres pourra être complétée par la procédure d'instruction générale de contrôle IGC 04.26.252 et 04.26.675 proposée par l'aérospatiale en recommandant de suivre la méthode A. Le calcul de la section de l'éprouvette  $S_F$  en  $\text{mm}^2$ , de la contrainte de rupture  $\sigma$ , du module d'Young  $E$  en MPa sera déterminé à partir des expressions :

$$S_F = \frac{M_1}{\rho * 1000} \quad (1.3.1)$$

où  $M_1$  est la masse linéique de la fibre sèche en tex ( $\text{g/cm}$ ) mesurée suivant l'IGC 04.26.650 et  $\rho$  la masse volumique de fibre sèche en  $\text{g/cm}^3$  mesurée suivant IGC 04.26.655

$$\sigma = \frac{F_R}{S_F} \quad \text{où } F_R \text{ est la charge de rupture en N} \quad (1.3.2)$$

$$E = \frac{\Delta F \cdot L_o}{\Delta(\Delta L) \cdot S_F} \quad \text{et } A\% = \frac{\Delta L_R * 100}{L_o} \quad (1.3.3)$$

où :  $L_o$  est la longueur de base de l'extensomètre  
et  $\Delta F$  et  $\Delta(\Delta L)$  sont déterminés à partir du diagramme d'enregistrement de l'essai.

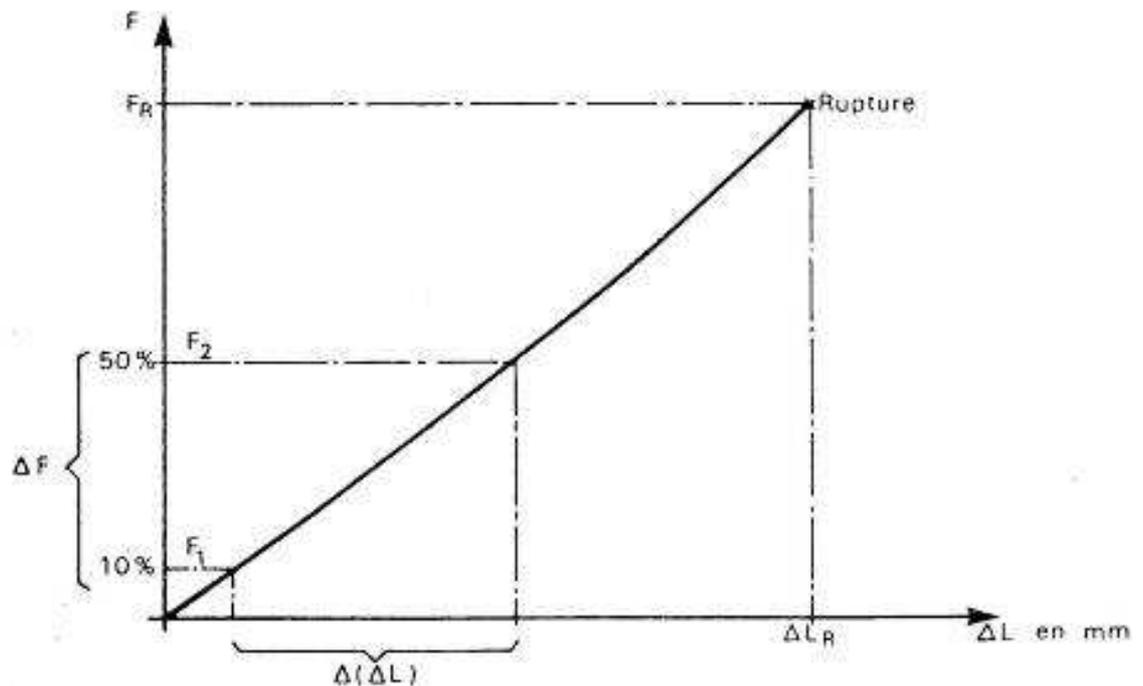


Figure 1.3.2. Courbe charge-déplacement (extrait NF EN ISO 5079)

### 1.3.3 Cas des tissus

La détermination de la force à rupture en traction et de l'allongement de rupture est fait suivant la méthode de la bande correspondant à la norme ISO 4606-1995 F.

Pour chaque direction (chaîne et trame), la force à rupture est mesurée pour des bandes de 50 mm de large. L'estimation de l'allongement à rupture est faite à partir de l'enregistrement entre pinces de l'extensomètre.

## 1.4 Détermination des caractéristiques des matrices polymères et adhésifs

### 1.4.1 Masses volumiques, densité

Ces caractéristiques sont déterminées suivant les procédures expérimentales décrites dans la norme NFT 51-063, réactualisées par la norme ISO 28-11.

### 1.4.2 Détermination des températures conventionnelles de transition vitreuse

Les principes de l'analyse calorimétrique différentielle (DSC ou AED : analyse enthalpique différentielle) suivant la norme NF.EN.12 614.

L'appareillage utilisé est un calorimètre différentiel décrit dans la norme ISO 11357-1 : 1997 (F) et le principe d'exploitation d'un enregistrement type DSC correspond à l'identification des trois points caractéristiques suivants :

- température de début de transition  $T_{ig}$  donnée par l'intersection de la ligne de base avec la tangente au point d'inflexion,

- température de fin de transition  $T_{eg}$  donnée par l'intersection de la ligne de base avec la tangente au point d'inflexion,
- température conventionnelle de transition  $T_g$  obtenue par l'intersection de la courbe et de la ligne médiane entre les deux lignes de base.

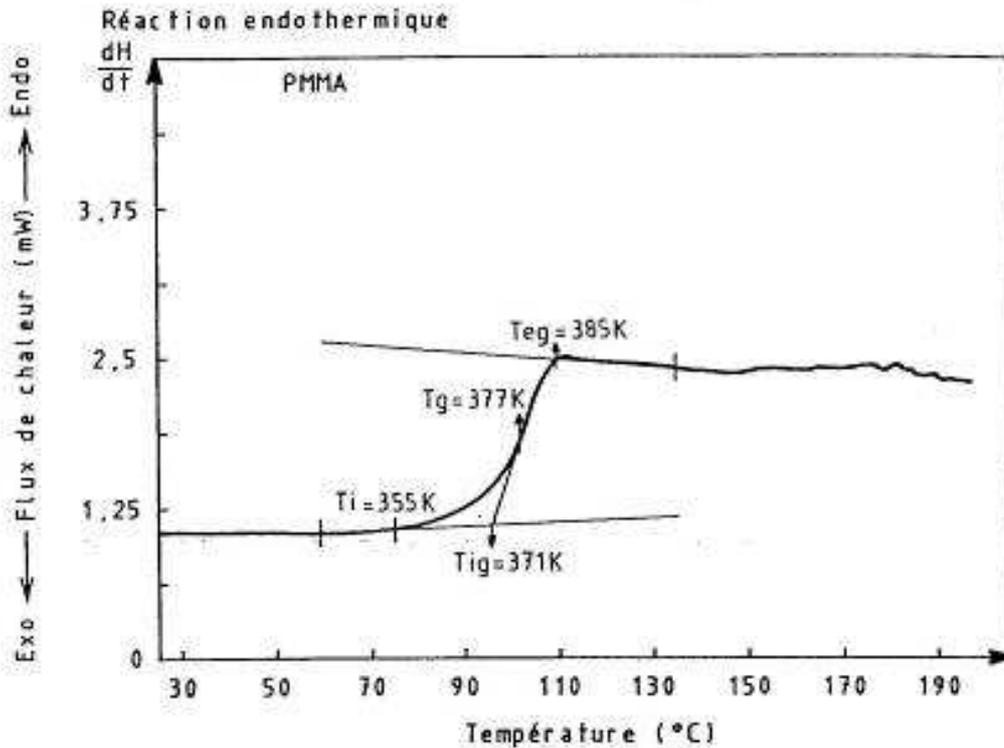


Figure 1.4.1. Diagramme type d'un polymère (extrait NFT 51-507-2)

Il est indispensable de définir "l'historique thermique" de l'éprouvette de polymère testée et de préciser le nombre et la nature des cycles thermiques réalisés avant mesure.

Par défaut, il est souhaité d'effectuer deux mesures successives sur le même échantillon, la première permettant d'avoir les caractéristiques du composite à matrice polymère en l'état, la deuxième d'avoir les caractéristiques du polymère « idéal » (totalement réticulé et sans vieillissement physique).

Il est indispensable que la mesure de la température de transition vitreuse soit connue dans des conditions correspondantes à celles de l'ouvrage en service (température, hygrométrie, âge...).

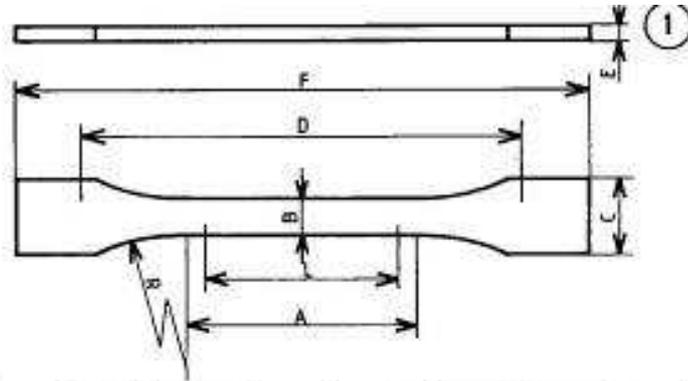
### 1.4.3 Détermination des propriétés mécaniques en traction des polymères

La procédure expérimentale est décrite dans les normes NFT 51 034/100/101/102/104 et NF EN ISO 527 1 à 5 dans le cas des matrices époxydes. Les procédures d'obtention des éprouvettes sont précisées par les normes NFT 58 001, 58 003, 58 005 ou ISO 178.

D'un point de vue général, les géométries d'éprouvettes doivent correspondre aux caractéristiques géométriques définies ci-dessous. L'exploitation des résultats permet d'exprimer la contrainte à rupture  $\sigma_u$ , la contrainte au seuil d'écoulement  $\sigma_{sb}$ , le module

d'élasticité tangent  $E_t$  et le module d'élasticité sécant  $E_s$  défini pour une valeur d'allongement conventionnelle.

De même, il est possible d'exprimer l'allongement au seuil d'écoulement ou à rupture.



L	A	B	E	F	C	D	R
50 ±0,5	60 ±0,5	10 ±0,5	4 ±0,6	150 mm	20 ±0,5	115 ±0,5	60 mn

Figure 1.4.2. Géométries d'éprouvettes en traction d'après les normes citées précédemment

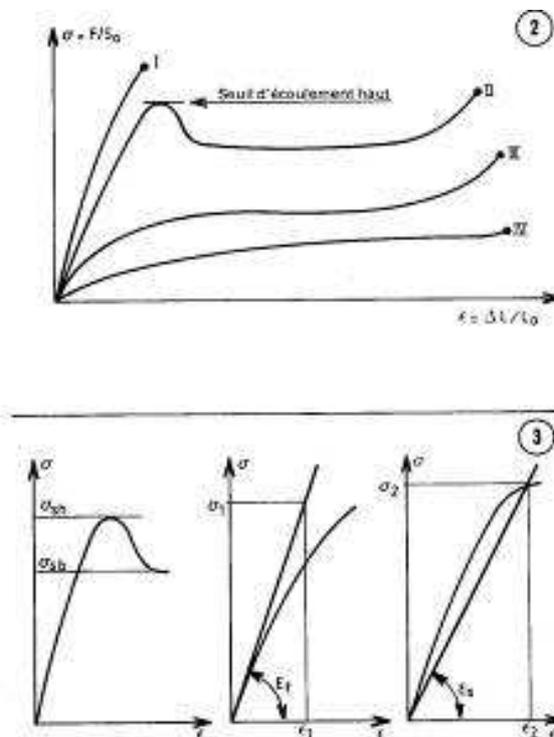


Figure 1.4.3. Loi de comportement en traction d'après les normes citées précédemment

#### 1.4.4 Détermination des propriétés mécaniques en compression des polymères

Cet essai est conduit sur un cylindre droit ou prisme droit. La norme NFT 51-101 ou ISO 604 définit les conditions d'essais et les principales caractéristiques mécaniques à identifier.

#### 1.4.5 Détermination des propriétés mécaniques en cisaillement des polymères

##### 1<sup>ère</sup> méthode : Essai d'Iosipescu

Les propriétés des polymères vis-à-vis du cisaillement peuvent être obtenues par l'essai d'Iosipescu défini par la norme ASTM D5379.

##### Mode opératoire

Son principe est décrit par la figure 1.4.4. Chaque extrémité de l'éprouvette est fixée dans un montage spécifique. Sous l'effet d'une charge de compression, une extrémité se déplace transversalement par rapport à l'autre, introduisant au sein de l'éprouvette une sollicitation de cisaillement.

Cet essai est utilisé sur des éprouvettes entaillées ou non entaillées pour la caractérisation des matériaux au cisaillement. Ce montage permet d'obtenir le module de cisaillement initial. La résistance au cisaillement est plus difficile à obtenir.

##### Dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes ont une longueur de 76 mm, une largeur de 19 mm et une épaisseur d'au moins 2.5 mm.

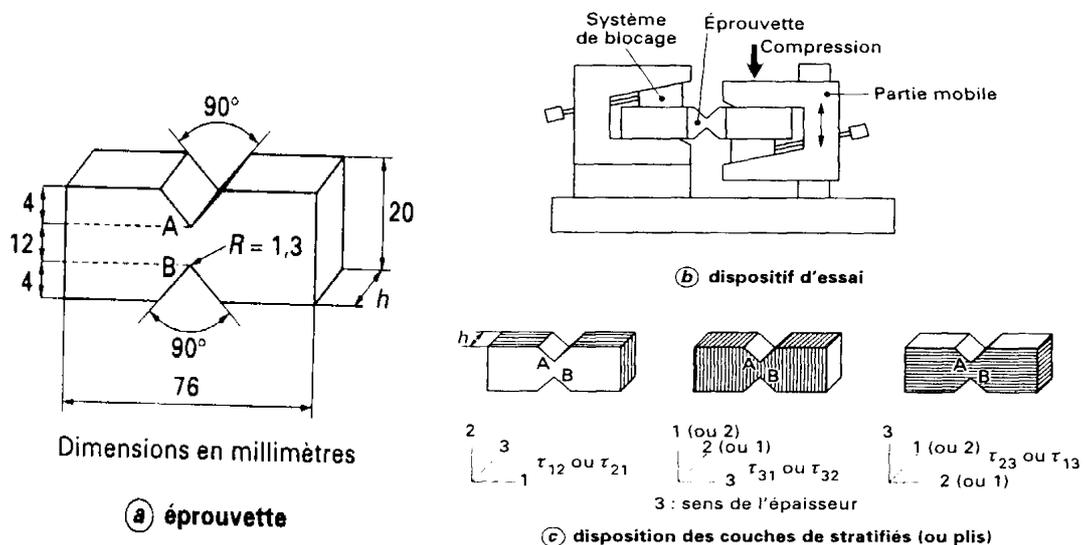


Figure 1.4.4. Essai d'Iosipescu

##### Expressions des résultats

Dans la mesure où des jauges de déformation sont implantées dans la zone AB, le module de cisaillement est calculé sur la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation.

**2<sup>ème</sup> méthode : Essai de flexion 3 points entre appuis variables (principe d'essai suivant la norme NFT 57-104)**

Mode opératoire

Les essais sont effectués sur une machine universelle par l'intermédiaire d'un dispositif de flexion trois points à distance entre appuis (L) variable (30 et 100 mm).

Les éprouvettes sont découpées à l'aide d'une scie diamantée dans des plaques d'épaisseur  $e \cong 2,5$  mm.

La largeur des barreaux obtenus (b) est fixée à 10 mm. Les tests sont effectués à la température ambiante. La vitesse de la traverse est fixée à 5 mm/min.

La variation des distances entre appuis est choisie pour que le rapport  $\lambda = L/h$  corresponde, dans les cas extrêmes, soit à une rupture en cisaillement  $\lambda < \lambda_c$ , soit à une rupture en traction-compression  $\lambda \gg \lambda_c$  (comme les matériaux composite carbon-époxyde ont un rapport  $\sigma_R / \tau_R$  de l'ordre de 20, la valeur de  $\lambda_c$  est de l'ordre de 10).

L'épaisseur moyenne des échantillons étudiés conduit à choisir une gamme de distance entre appuis de 20 à 100 mm.

Expressions de calcul

$$\sigma = \frac{3.F.L}{2b.h^2} \quad (1.4.1)$$

$$E_{app} = \frac{L^3}{4.b.h^3} \frac{F}{W}$$

La flèche totale W peut se mettre sous la forme :

$$W = P \lambda^3 / 4b E_{11} \{ 1 + (E_{11} / G_{13}) (\alpha' / \lambda^2) \} \quad (1.4.2)$$

L'examen de l'équation de la flèche montre qu'il est possible de calculer les grandeurs du module d'Young longitudinal  $E = E_{11}$  et  $G = G_{13}$  (module de cisaillement transverse) à partir de deux essais de flexion réalisés pour des distances entre appuis différentes.

Une autre façon de procéder consiste à définir un module apparent  $E_{app}$  fonction de  $\lambda$  tel que :

$$E_{app} = P \lambda^3 / 4 b W \quad (1.4.3)$$

En remplaçant (2) dans (1), on peut écrire :

$$1 / E_{app} = 1 / E_{11} + (\alpha' / G_{13}) (1 / \lambda^2) \quad (1.4.4)$$

Cette équation met en évidence une relation linéaire entre l'inverse du module apparent et le carré de l'inverse du rapport L/h.

Une série d'essais de flexion effectués à plusieurs distances entre appuis permet d'obtenir, par régression, les modules  $E = E_{11}$  et  $G = G_{13}$  avec une plus grande précision.

#### ***1.4.6 Détermination des propriétés thermo-mécaniques des polymères***

En complément des mesures de température de transition vitreuse traitées au point 1.4.2., les propriétés thermo-mécaniques des polymères peuvent être identifiées à partir des essais suivants :

- mesure de la température de fléchissement sous charge NFT 51-005,
- mesure de la température de ramollissement VICAT NFT 51-021,
- mesure de la température de déformation (essai Martens) NFT 51-070,
- mesure par oscillations libres NFT 51-104.

### ***1.5 Détermination du pourcentage volumique de renfort et de matrice polymère constituant le composite***

#### ***1.5.1 Composite à renfort verre***

La détermination des pourcentages massiques et volumiques des composants est effectuée par calcination suivant les procédures décrites dans les normes ISO 1172 et NFT 57-102.

#### ***1.5.2 Cas des préimprégnés***

La détermination des taux de résine, de fibre de renfort et de charge minérale est réalisée en suivant les directives et les procédures décrites dans la norme ISO 1167 : 1997 (F).

#### ***1.5.3 Cas des composites à renfort carbone***

Dans l'attente d'une norme européenne, nous recommandons de suivre les instructions générales de contrôle proposées par l'Aérospatiale (IGC 0426230, IGC 0426205) et plus particulièrement la méthode 2.

1. Déterminer la masse surfacique du préimprégné  $M_{sf}$  suivant l'IGC 04-26-205 de l'Aérospatiale.
2. Prélever, dans le stratifié, une éprouvette de 20 mm x 10 mm à 0,01 mm près (type de cisaillement interlaminaire).
3. Détermination de la masse volumique :
  - Peser l'équipage en position de travail (support d'éprouvette immergé dans le béccher). Soit  $M_0$  sa masse en grammes à 1 mg près. Ce dispositif reste en place durant toute la manipulation (1).
  - Peser l'échantillon dans l'air (position A de l'annexe), soit  $M_1$  la masse obtenue à 1 mg près.
  - Peser l'échantillon dans l'eau (transfert de l'échantillon à la position B de l'annexe) après l'avoir préalablement mouillé pour éviter l'accrochage de bulles

en surface lors de l'immersion. Soit  $M_2$  la masse apparente obtenue à 1 mg près. Cette opération doit être effectuée rapidement afin d'éviter au maximum l'absorption d'eau dans le stratifié.

- (1) Si l'on tare la balance avec l'équipage, la masse  $M_0$  est nulle dans toute la suite des calculs (ne pas oublier de remettre la balance à zéro en fin de manipulation lorsqu'on enlève le bécher et le support d'éprouvette).

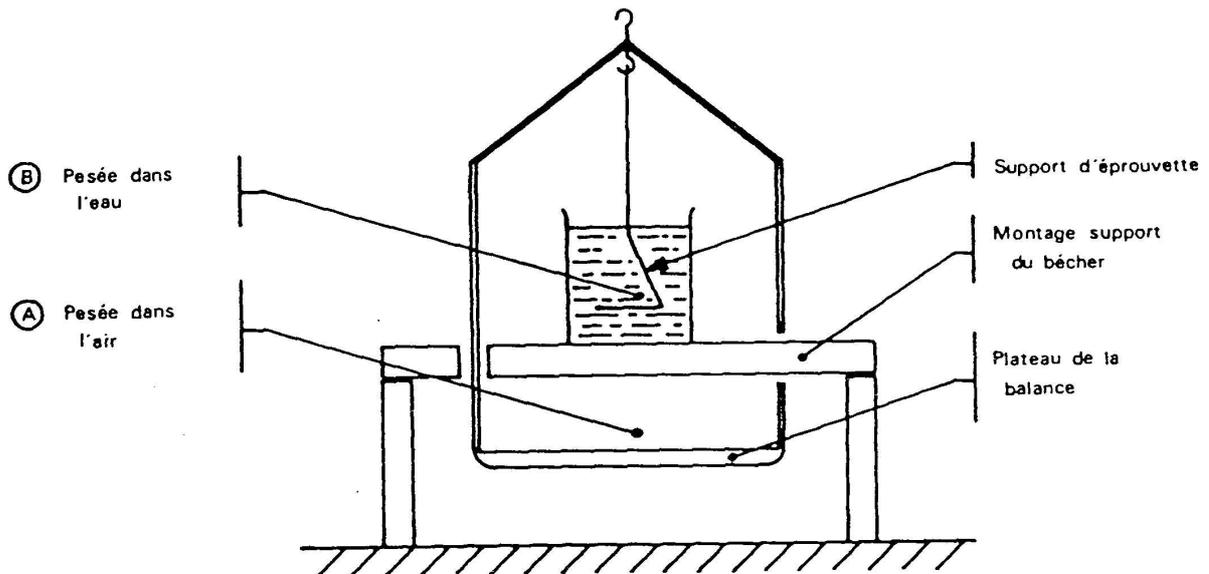


Figure 1.5.1. Principe de l'essai

### Exploitation des résultats

Unités utilisées :

$M_0, M_1, M_2$	: g
L, b	: mm
$\rho, \rho_o, \rho_f, \rho_r$	: g/cm <sup>3</sup>
$M_{ss}, M_{sf}$	: kg/m <sup>2</sup>

On connaît :

- la masse volumique de la fibre  $\rho_f$ ,
- la masse volumique de la résine  $\rho_r$ ,
- la masse volumique de l'eau  $\rho_o$ ,
- le nombre de plis n.

	Méthode 2
Masse volumique du stratifié	$\rho = \rho_o \frac{M_1 - M_o}{M_1 - M_2}$ (1.5.1)
Masse surfacique par pli du stratifié	$M_{ss} = \frac{M_1 - M_o}{L.b.n}$ (1.5.2)
Taux massique de fibres	$m_f = \frac{M_{sf}}{M_{ss}} * 100$ (1.5.3)
Taux volumique de fibres	$V_f = m_f \frac{\rho}{\rho_f}$ (1.5.4)
Taux volumique de résine	$V_r = (100 - m_f) \frac{\rho}{\rho_r}$ (1.5.5)
Taux volumique de porosité	$V_o = 100 - V_f \cdot V_r$ (1.5.6)

## 1.6 *Recommandations pour la fabrication des plaques stratifiées in situ pour essais mécaniques*

### 1.6.1 *Conditions d'application*

Les présentes recommandations s'appliquent à la technique de renforcement selon laquelle les systèmes composites mis en œuvre (matrices polymères therm durcissables, tissus textiles techniques verre ou carbone) sont appliqués sur la structure en béton par des techniques de moulage au contact.

### 1.6.2 *Moulage au contact*

Les couches de renforts sont appliquées sur une plaque plane rigide et imprégnées manuellement avec de la résine liquide formulée suivant les recommandations du fournisseur pour polymériser en fonction du temps dans les mêmes conditions d'environnement que celles du chantier.

### 1.6.3 *Matériaux mis en œuvre*

- Les couches de renforts, découpées aux dimensions de la plaque, sont positionnées dans les directions de stratification choisies pour la réparation.
- La résine therm durcissable est formulée suivant les instructions du fournisseur et de l'applicateur.
- Les agents de démoulage peuvent être appliqués sur le moule pour la fabrication des plaques d'essais.

#### 1.6.4 Dimensions de la plaque

La dimension recommandée est de 600 mm x 600 mm pour permettre le découpage d'éprouvettes pour les essais de traction, flexion et cisaillement dans les deux directions parallèles aux bords de la plaque. L'épaisseur devra être comprise entre 2 et 10 mm.

#### 1.6.5 Pourcentage de renfort

Le pourcentage volumique et massique du renfort et de la résine sera défini par l'applicateur conformément à la formulation sélectionnée pour la réparation de l'ouvrage en béton. Il pourra être vérifié suivant les procédures décrites préalablement (1.5.1 et 1.5.2.).

#### 1.6.6 Matériel nécessaire à la mise en œuvre

- ciseaux et lames coupantes pour la découpe des tissus,
- balance pour les pesées à 0,1 g près,
- récipients pour le mélange (verre, PE, PP),
- brosses ou pinceaux pour l'imprégnation,
- rouleaux ébulleurs,
- plaque d'acier polie pour servir de moule.

#### 1.6.7 Procédure

- Le nombre de couches, leur orientation, le pourcentage et le type de renfort, le pourcentage et la nature de la résine sont fixés.
- La plaque de support pour le moulage sera revêtue de l'agent de démoulage qui doit être mis en œuvre suivant les recommandations du fournisseur.
- Les couches de renforts sont découpées à la dimension du moule.
- Pour le nombre de couches sélectionnées, le poids des renforts est noté : (A).
- La quantité de résine (B) nécessaire pour la réalisation de la plaque sera

$$\text{déterminée suivant l'expression : } B = A \times \left( \frac{100 - G}{G} \right) \times 1,2 \quad (1.6.1)$$

B : masse de la résine en grammes,

A : masse des renforts fibreux en grammes,

G : pourcentage du poids total correspondant à la quantité de renfort souhaité.

Dans cette expression, il y a 20 % de résine en excès pour tenir compte des pertes lors de la mise en œuvre. Une première expression définissant le nombre de couches qui permet d'obtenir l'épaisseur et le taux de renfort est la suivante :

$$n = \frac{e \cdot \rho_g \cdot \rho_r \cdot b}{g \left[ b \rho_r + \rho_g - (1 - b) \right]} \quad (1.6.2)$$

n : nombre de couches,

e : épaisseur de la plaque en cm,

$\rho_g$  : masse volumique du renfort ( $\text{g/cm}^3$ ),

$\rho_r$  : masse volumique de la résine ( $\text{g/cm}^3$ ),

b : taux de renfort en masse exprimé en % ramené à l'unité,

g : masse par unité de surface de renfort ( $\text{g/cm}^2$ )

- La résine est conditionnée à la température correspondant à celle des conditions de stratification avant l'ajout des agents de thermodurcissement.
- Une première couche fine de résine est appliquée en fond de moule. Ensuite, la première couche de tissus est plaquée sur le film de polymère. On assure la bonne imprégnation du renfort par l'utilisation de pinceaux ou de brosses. L'élimination des bulles d'air est obtenue par l'utilisation d'un rouleau ébulleur. La stratification est poursuivie comme précédemment jusqu'à l'obtention de l'empilement sélectionné. Un film de cellophane est disposé en face supérieure pour assurer le surfaçage de la face supérieure.

### ***1.6.8 Conditions de cure***

Les conditions de durcissement seront celles recommandées par le fournisseur de matériaux composites et par l'applicateur.

On distinguera deux types de cure :

- le cas d'une cure décrite et recommandée par le fournisseur qui permettra de réaliser des plaques de composites pour prélever des éprouvettes et caractériser le matériau dans des conditions de laboratoire;
- le cas d'une cure décrite et recommandée par le fournisseur de composite et l'applicateur qui permettra de réaliser des plaques de composites pour prélever des éprouvettes et caractériser le matériau dans les mêmes conditions de température et d'environnement que celles du chantier.

### ***1.6.9 Vérification des caractéristiques des plaques d'essais obtenues***

Un examen visuel permettra de confirmer si la stratification et l'imprégnation ont été satisfaisantes.

Le contrôle du pourcentage massique et volumique des renforts est réalisé suivant les normes européennes en vigueur.

Le pourcentage de vide et l'épaisseur des couches pourront être fournis s'ils sont exigés lors de l'établissement du cahier des charges spécifiques à l'opération de réparation.

### ***1.6.10 Repérage et référence des plaques***

Chaque plaque sera repérée en précisant :

- la nature des composants,
- la direction des renforts,
- la formulation complète,
- les conditions de cure,
- les date et heure de fabrication,
- les noms des exécutants et leur appartenance.

## 1.7 Détermination des propriétés mécaniques en traction des composites stratifiés *in situ*

### 1.7.1 Prélèvement des éprouvettes

Les principes généraux sont ceux décrits dans les normes ISO 527-1, ISO 527-2, ISO 527-5, ISO 2818.

- Les éprouvettes seront découpées dans les plaques suivant les deux directions orthogonales référencées longitudinales et transversales (cf. § 1.6).
- Les bords de la plaque seront éliminés suivant une bande de 5 cm sur tout le contour.

### 1.7.2 Conditionnement des éprouvettes

Les éprouvettes seront testées dans des conditions normales d'humidité et de température (20°C, 50 % HR).

### 1.7.3 Dimensions des éprouvettes

- Les éprouvettes sont de géométrie parallélépipédique
- La longueur des éprouvettes est fixée à 250 mm,
- La largeur des éprouvettes est fixée à 25 mm,
- L'épaisseur correspond à l'épaisseur des plaques,
- La distance entre talons est de 150 mm,
- Les talons ont une longueur de 50 mm,
- L'épaisseur des talons est de 0,5 à 2 mm.

Les talons pourront être constitués soit de stratifié verre-résine suivant les recommandations de la norme EN ISO 527-5 ou en aluminium ou autre matériau suivant les recommandations de la norme EN ISO 527-1 et ISO 3534-1.

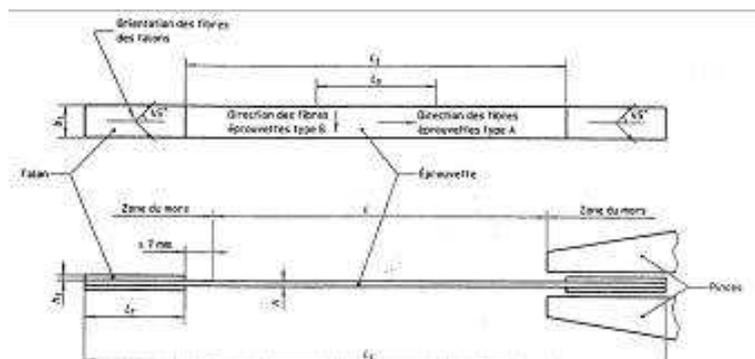


Figure 1.7.1. Eprouvette suivant les normes citées en référence

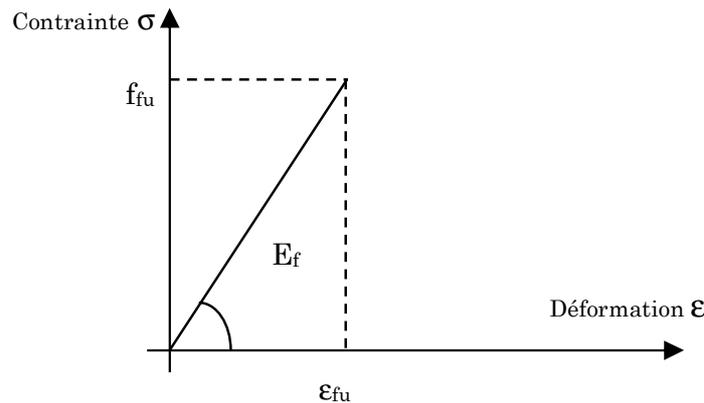
### 1.7.4 Mode opératoire

- Mesure des dimensions des éprouvettes
- Les sections des éprouvettes sont mesurées au pied à coulisse à 0,01 mm près.
- Fixations
- Les talons sont introduits dans la machine d'essais de telle sorte qu'ils soient au moins à 7 mm à l'intérieur du mors.

- Réglages des extensomètres, jauges de déformation, capteurs ohmiques : les recommandations de la norme ISO 527-1 seront appliquées.
- La vitesse d'essai est de 1 mm/min.

### 1.7.5 Résultats

- L'ensemble des résultats est présenté suivant la norme ISO 527-1. Les éprouvettes présentant une rupture dans les mors sont éliminées.



$R_f$  : force de résistance en traction du composite,  $f_{fu}$  : contrainte de traction à la rupture (selon notation du présent guide),  $\varepsilon_{fu}$  : déformation à la rupture en traction (selon notation du présent guide),  $E_f$  : module d'Young en traction,  $\nu_f$  : coefficient de poisson.

Figure 1.7.2. Courbe contrainte-déformation

### 1.7.6 Exploitation des résultats

Pour dimensionner des systèmes de renforcement suivant les recommandations de l'AFGC, les propriétés mécaniques statiques des renforts composites pourront être exprimées en considérant la section totale des matériaux composites stratifiés ou la section nette rapportée aux fibres.

Il est impératif d'exploiter l'une ou l'autre des expressions ci-dessous :

- a) Performance de la réparation en fonction des caractéristiques en traction du matériau composite multicouche

$$\text{La force reprise par le système de réparation en N/mml} = \frac{\text{Contrainte de rupture du composite en N/mm}^2}{\text{Epaisseur en mm}}$$

(mml : millimètre linéaire)

- b) Performance de la réparation en fonction des propriétés des renforts

$$\text{La force reprise par le système de réparation en N/mml} = \frac{\text{Contrainte de rupture des fibres en N/mm}^2}{\text{Section des fibres par plis de composites en mm}^2} \times \text{Nombre de plis}$$



- Placer l'éprouvette mesurée sur les appuis de façon que les plans de stratification soient parallèles au plan défini par les appuis.
- Amener le poinçon en contact avec l'éprouvette.
- Régler la vitesse de descente du poinçon à 1 mm/mn.

La rupture de la liaison entre les couches est caractérisée par une chute de charge (accompagnée par un bruit sec plus ou moins perceptible).  
Noter la charge au moment de la rupture.

### 1.9.3 Calculs et expressions des résultats

Pour chaque éprouvette, calculer la contrainte de cisaillement à la rupture suivant la formule :

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{F}{bh} \quad (1.9.1)$$

$\tau$  est exprimé en MPa (équivalent au MN/m<sup>2</sup>)

avec : F = charge appliquée sur l'éprouvette, en newtons  
h = épaisseur de l'éprouvette, en millimètres  
b = largeur de l'éprouvette, en millimètres.

La contrainte de cisaillement en flexion du matériau considéré est la moyenne arithmétique des valeurs calculées pour les 10 éprouvettes. Calculer l'écart-type et éventuellement l'intervalle de confiance au niveau de probabilité de 95 %.

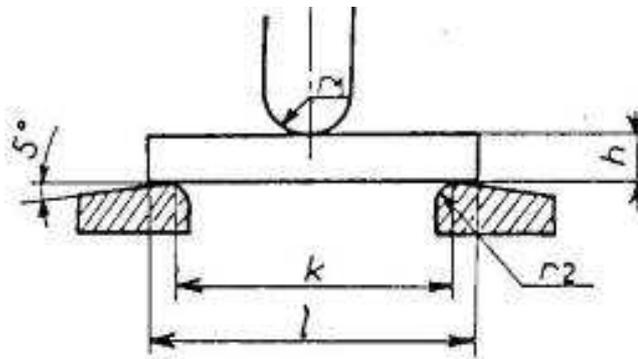


Figure 1.9.1. Schéma de montage suivant le principe de la norme NFT 57-104

### 1.9.4 Extension de la méthode pour l'évaluation du module de cisaillement plan

La même procédure expérimentale que celle proposée au paragraphe 1.4.5. (2<sup>ème</sup> méthode : méthode de flexion 3 points à distance entre appuis variables) permet de déterminer le module de cisaillement plan du composite  $G_f$ .

L'ensemble de la procédure expérimentale permet de déterminer les valeurs moyennes,  $\tau_{ad,u}$ ,  $G_f$  pour le composite.

### 1.10 Détermination de la tenue au délaminage par cisaillement interlaminaire

La contrainte de cisaillement interlaminaire peut être également évaluée suivant la norme ASTM D 3165.

Cet essai consiste à solliciter, en traction-cisaillement, une interface à simple recouvrement. Cet essai permet d'évaluer la tenue au cisaillement de l'interface composite/composite.

#### 1.10.1 Appareillage

Une machine de traction universelle est nécessaire pour la réalisation de cet essai.

#### 1.10.2 Mode opératoire et préparation des éprouvettes

La dimension des éprouvettes est de 190 x 25 mm<sup>2</sup>. Un plan de cisaillement de 25 mm x 12,7 mm est usiné. La plaque composite est faite de 4 plis de composite permettant d'obtenir une plaque d'une épaisseur de 4 mm. Deux entailles de 2,5 mm au moins sont réalisées de part et d'autre de l'éprouvette. Pour chaque essai, 6 éprouvettes doivent être réalisées.

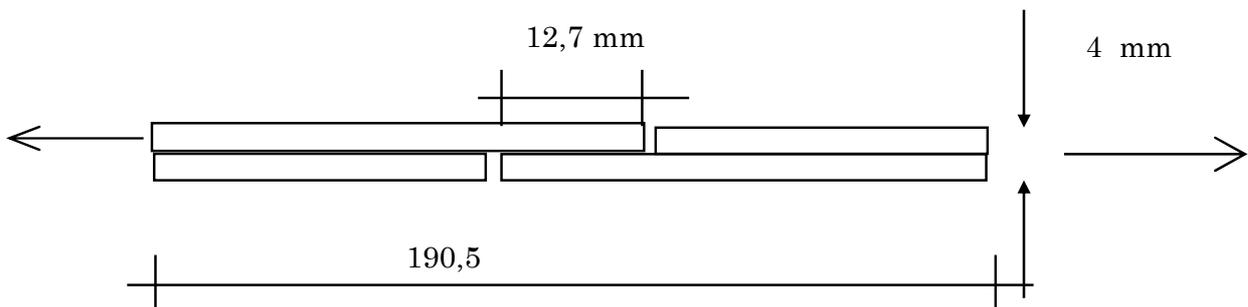


Figure 1.10.1 : éprouvette d'essai (extrait ASTM D 3165)

#### 1.10.3 Calcul et expression des résultats

Le calcul de la contrainte de cisaillement moyen est réalisé par :

$$\tau_{\text{moy}} = \frac{F_{\text{rupture}}}{\text{Surface de collage}} = \tau_f \quad (1.10.1)$$

Les éprouvettes présentant un mode de rupture dans le plan des fibres ne seront pas considérées pour le calcul des résistances moyennes. De même, tout résultat s'écartant de plus de 15 % de la moyenne est éliminé.

**L'ensemble de la procédure expérimentale permet de déterminer la valeur moyenne  $\tau_f$  pour le composite.**

### ***1.11 Détermination des propriétés mécaniques de l'interface composite-béton***

*La connaissance des propriétés d'interface composite-béton est particulièrement importante pour juger de l'efficacité de la réparation, de sa fiabilité et de sa durabilité.*

L'absence de normes sur le sujet conduit le groupe de travail de l'AFGC à recommander deux procédures expérimentales, la première correspond à un essai sur joint de colle à double recouvrement, le deuxième est un essai sur joint de colle à simple recouvrement.

#### ***1.11.1 Essai sur joint de colle à double recouvrement***

##### *a) Domaine d'application*

La détermination des lois de comportement en cisaillement de l'interface béton/composite s'applique aux trois procédures de réparation/renforcement : collage de plaque pré-imprégnée moulée en usine, collage de plaques pultrudées, stratification au contact de renforts.

La méthode expérimentale peut s'appliquer à tout système de réparation composite (matrice polymère renforcée de fibres).

Pour pouvoir établir une loi de comportement en cisaillement, le dimensionnement des éprouvettes et la surface de collage sont définis en recherchant à minimiser les effets des contraintes locales pour permettre une exploitation à partir d'un calcul de contraintes moyennes.

##### *b) Références normatives*

Les références d'essais de caractérisation des interfaces sont données ci-dessous :

- M.J. Chajes et al, Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete, ACI structural journal, Vol 93 N°2, p. 208-217, 1996
- B. Täljsten, Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete, International journal of adhesives, vol 17 N°4, 1997
- Okano et al, A study on strengthening with carbon fiber of existing reinforced concrete structure, Research report of Obayashi Technical Research Institute, n°43, p. 29-32, 1986
- E. Ferrier, P. Hamelin, Influence of time-temperature loading on carbon epoxy reinforcement for concrete structures, ACI publications, SP-188-44, p. 491-500, 1999.

Les références concernant la mise en œuvre du béton sont données ci-dessous :

- NF EN 18-422 Bétons - Mise en place par aiguille vibrante

##### *c) Principe*

Cet essai correspond à un essai de traction-cisaillement à double recouvrement (blocs de béton parallèles assemblés sur deux faces symétriques par les matériaux de renforcement).

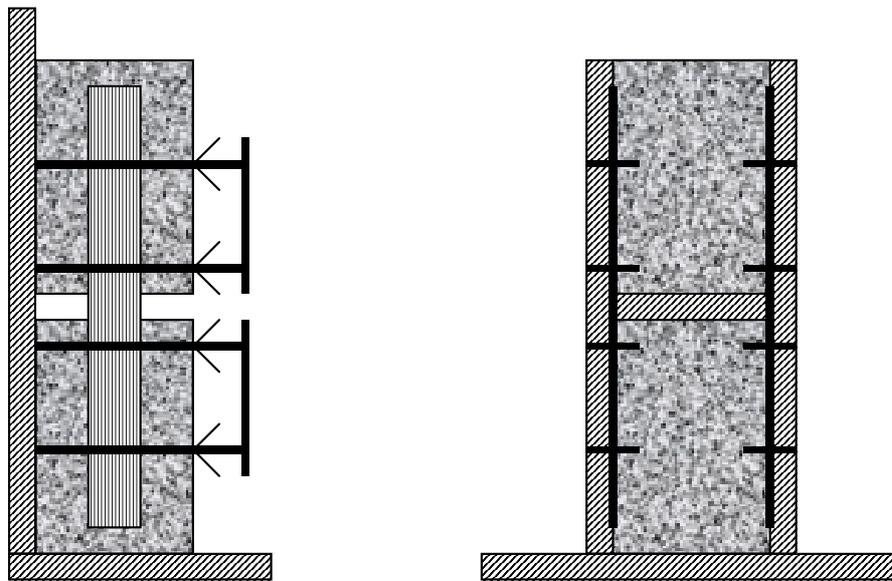
*d) Préparation de l'essai*

**Fabrication du béton**

Les blocs de béton ont pour dimensions 140 mm x 140 mm x 250 mm, ils sont mis en œuvre dans un moule de dimensions 140 x 140 x 560 mm<sup>3</sup>, avec un élément de séparation d'épaisseur 60 mm. L'objectif est d'obtenir un alignement parfait des faces latérales des blocs. Le béton est préparé et mis en œuvre suivant la norme NF EN 18-422. Sa résistance à la compression à 28 jours doit être supérieure à 40 MPa.

**Mise en place de renforts**

Les blocs de béton sont alignés sur un gabarit permettant de maintenir un alignement des blocs de béton pendant toute la période de stratification et de cure du composite. La tolérance sur l'alignement des faces d'encollage est de 0.25 mm sous la règle de 20 cm. La stratification de renforts composites de dimensions 420 x lar mm<sup>2</sup> sur deux faces latérales (figure 1.11.2), en laissant un espacement de 20 mm entre chacun des blocs. Cette stratification est ensuite réalisée conformément à la fiche technique de mise en œuvre relative à chacun des procédés.



*Figure 1.11.1. Alignement des blocs à l'aide de gabarit*

La largeur de la bande composite ( $l_{ar}$ ) est fixée à 60 mm dans le cas des renforts stratifiés au contact et à 20 mm dans le cas des plats pultrudés. L'épaisseur ( $t_c$ ) de la bande composite est calculée par la relation ci-dessous pour permettre de solliciter le renfort en partie centrale à 70 % de la contrainte à la rupture du composite ( $f_f$ ).

$$t_c \geq \frac{430}{f_f} \quad (\text{mm}) \quad (1.11.1)$$

avec :  $t_c$  : épaisseur du composite ( $t_f$  selon la notation du présent guide);  
 $f_f$  : contrainte ultime du composite ( $f_{fu}$  selon la notation du présent guide)

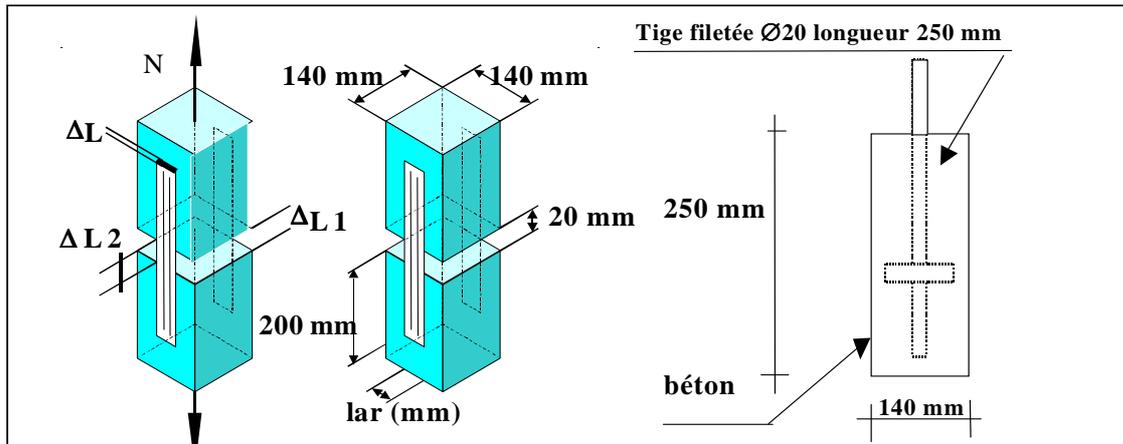


Figure 1.11.2. Dimensions des corps d'épreuve

### Nombre d'éprouvettes

Le nombre d'éprouvettes est fixé à trois pour chaque type de renfort.

### Conditionnement de l'éprouvette après mise en œuvre des renforts

Les éprouvettes sont ensuite conservées conformément à la fiche technique de mise en œuvre de chacun des procédés.

### e) Mode opératoire

#### Conditions de chargement

Les efforts de traction sont appliqués par l'intermédiaire de rotules localisées au niveau des mors pour supprimer toute flexion parasite. La vitesse de chargement est de 1 mm/min. L'essai est conduit jusqu'à rupture.

#### Instrumentation

L'écartement des deux blocs ( $\Delta L_1$  : mesure par capteur de déplacement) est dû, d'une part, à l'allongement ( $\Delta L_2$ ) de l'élément de renfort (mesure par jauge de déformations) et d'autre part, à la déformation ( $\Delta L$ ) au niveau de l'interface entre le béton et le composite.

L'écartement des deux blocs ( $\Delta L_1$ ) est enregistré en continu par capteurs de déplacement de type LVDT de course  $\pm 5$  mm de précision  $10^{-4}$  mm (figure 1.11.2). La mesure de l'allongement du composite est effectuée par jauge de déformation (figure 1.11.3).

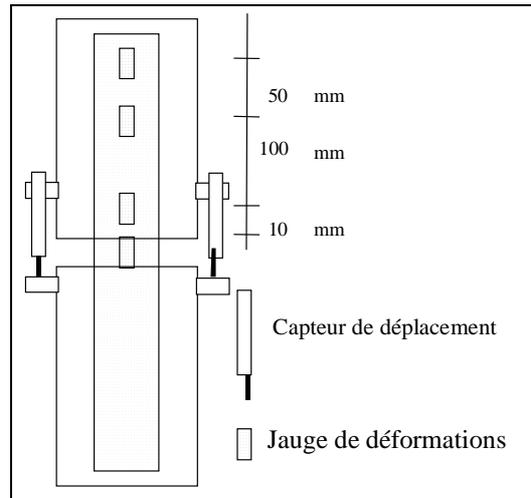


Figure 1.11.3. Mesure des déplacements et des déformations

#### f) Expressions des résultats

L'ensemble des résultats obtenus par l'expérimentation et l'instrumentation est décrit ci-dessous.

#### Calcul de la contrainte moyenne

La contrainte moyenne appliquée au joint de colle est établie par la relation suivante :

$$\tau_{ad,u} = \frac{F}{S_{\text{collage}}} \quad (\text{MPa}) \quad (1.11.2)$$

avec :  $\tau_{ad,u}$  : contrainte moyenne ultime (MPa) ;  
 $F=N/2$  : effort repris par un plat composite ;  
 $S_{\text{collage}}$  : surface de collage (12000 mm<sup>2</sup> pour un stratifié ou 4000 mm<sup>2</sup> pour les pultrudés)

#### Calcul de la déformation de cisaillement et du module de cisaillement

La déformation de cisaillement ( $\varepsilon_{xy,adu}$ ) moyenne est calculée par la relation suivante :

$$\varepsilon_{xy,adu} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2}{2 \cdot t_{ad}} \quad (\text{m/m}) \quad (1.11.3)$$

avec :  $\Delta L_1 - \Delta L_2$  : déplacement moyen dans le joint de colle,  
 $t_{ad}$  : épaisseur du joint de colle

Le module de cisaillement ( $G_{ad}$ ) de l'interface (en MPa) est évalué par la relation suivante :

$$G_{ad} = \frac{\tau_{ad}}{\varepsilon_{xy,adu}} \quad (\text{MPa}) \quad (1.11.4)$$

### Calcul de la contrainte maximale en extrémité de plaque

La formulation analytique définie par la relation suivante permet d'obtenir la valeur de la contrainte maximale appliquée à l'extrémité de l'interface,  $\tau_{ad,max}$ .

$$\tau_{ad,max} = \frac{N \cdot G_{ad}}{2 \cdot t_{ad} \cdot w} \cdot \left( -\frac{1}{E_{cm} \cdot 19600} + \frac{1}{2 \cdot E_f \cdot A_f} \right) \cdot \left( \tanh(w \cdot 100) + \frac{1}{\tanh(w \cdot 100)} \right) \text{ (MPa)}$$

avec

$$w = \sqrt{\frac{G_{ad} \cdot l_{ar}}{t_{ad}} \cdot \left( \frac{1}{A_f \cdot E_f} + \frac{2}{19600 \cdot E_{cm}} \right)} \quad (1.11.5)$$

et

- N : effort maximal appliqué (N) ;
- $G_{ad}$  : module de cisaillement de la colle ou de la résine de stratification (MPa) ;
- $t_{ad}$  : épaisseur de l'interface (mm) à défaut de mesure précise nous considérons une épaisseur de 0,3 mm pour un moulage au contact et une épaisseur de 1 mm pour le collage de pultrudés ;
- $l_{ar}$  : largeur des renforts
- $E_{cm}$  : module d'élasticité du béton (MPa) ;
- $E_f$  : module d'élasticité du composite (MPa) ;
- $A_f$  : section de composite (mm<sup>2</sup>).
- $\tau_{ad,max}$  : correspond à la contrainte moyenne ultime de cisaillement notée  $\tau_{ad,u}$  dans le présent guide

### Lois de comportement : contraintes moyennes - déformations moyennes

L'expression des contraintes moyennes en fonction des déformations de cisaillement moyennes permet, pour chaque niveau de chargement, d'établir une relation  $\tau = f(\epsilon_{xy,ad})$  définie comme étant la loi de comportement en cisaillement de l'interface. Cette loi de comportement est bi-linéaire, elle est illustrée par la figure 1.11.4.

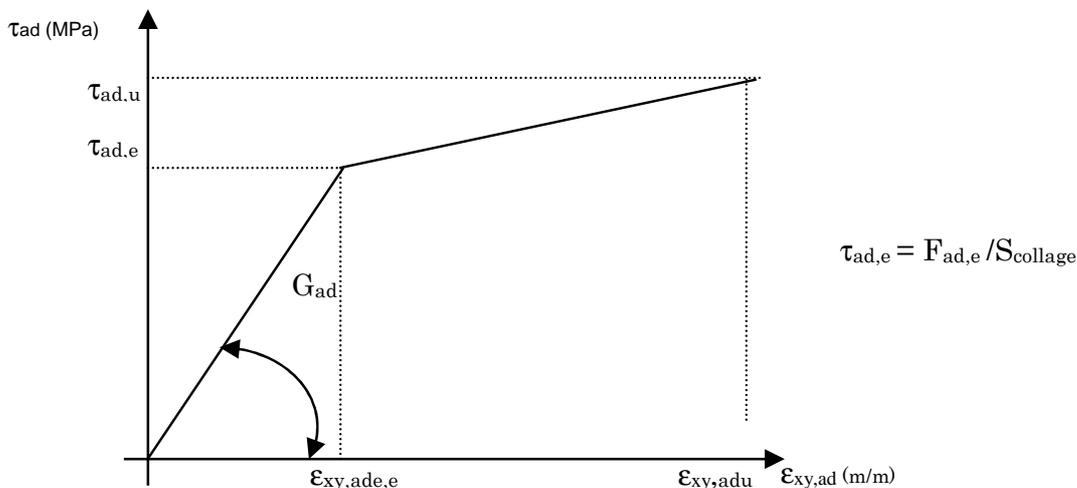


Figure 1.11.4. Relation de comportement mécanique  $\tau = f(\epsilon_{xy,ad})$

### Evaluation de la contrainte moyenne à la limite de linéarité

La contrainte moyenne à la limite de linéarité ( $\tau_{ad,e}$ ) est définie comme étant la valeur de la contrainte moyenne correspondant au début de rupture du plan de collage définie sur la courbe par une variation significative (supérieure à 10 %) de la pente initiale du diagramme ( $\tau_{ad}, \varepsilon_{xyade,e}$ ). Cette valeur doit être considérée pour le calcul des longueurs d'ancrage du renfort.

### Estimation de la longueur d'ancrage expérimentale $l_{anc,exp}$

La longueur d'ancrage expérimentale  $l_{anc,exp}$  est la longueur de transfert nécessaire pour pouvoir solliciter le composite au maximum de sa capacité. Elle est déterminée comme suit :  $\tau_{ad,e}$  est la valeur moyenne du cisaillement supposé constant sur toute la longueur de collage égale à 200 mm.

Cette valeur correspond à un effort de traction dans le composite égal à  $F_{ade}$ .

La longueur d'ancrage expérimentale est donnée, pour  $F_{ade} < R_f$ , par :

$$l_{anc,exp} = 200 \text{ mm} \cdot \frac{R_f}{F_{ade}} \quad (1.11.6)$$

avec  $R_f$  la résistance à la traction du composite définie en 1.7 et 1.8

Si  $F_{ade} = R_f$  on prendra  $l_{anc,exp} = 200 \text{ mm}$

### Evaluation de la contrainte à rupture ( $\tau_{ad}$ ) de l'interface

Le mode de rupture sera précisé (rupture du béton de substrat, rupture du composite, rupture de la colle (adhésif-cohésif ou de l'interface)).

La contrainte à rupture  $\tau_{ad,u}$  est déterminée à partir de la force à rupture et de l'expression du calcul de la contrainte moyenne mentionnée ci-dessus.

#### 1.11.2 Essai à simple recouvrement

##### a) Domaine d'application

Un essai à simple recouvrement peut être réalisé pour déterminer les lois de comportement en cisaillement de l'interface béton/composite. Il s'agit d'un essai de cisaillement par traction directe d'un joint à simple recouvrement sur dalle épaisse. Le respect rigoureux de la procédure décrite ci-après permet de se soustraire des effets de flexion qu'engendrerait une sollicitation hors de l'axe de traction.

##### b) Références bibliographiques

- Collection des Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées (ERLPC) – série Ouvrages d'art – N° OA 54. Renforcement des ouvrages en béton par collage de composites : Bilan de deux opérations de recherche du LCPC. Mars 2006
- CHATAIGNER S., AUBAGNAC C., QUIERTANT M., BENZARTI K. Essai de cisaillement à simple recouvrement pour caractériser l'adhérence de renforts composites sur substrat béton, Méthode d'essai n°72, 36 pages, Techniques et méthodes des LPC, LCPC, avril 2010.

c) *Préparation de l'essai à simple recouvrement*

**Fabrication des dalles support**

Les dalles support ont pour dimension: 600 mm \* 1000 mm \* 200 mm. La résistance à la compression du béton, mesurée à 28 jours sur cylindres, doit être supérieure à 40 MPa. On attendra 28 jours de cure avant de procéder à la préparation des surfaces (suivant les préconisations de la fiche technique du procédé) et à l'application des renforts.

**Mise en place des renforts**

Les renforts sont collés à partir du bord de la dalle sur une longueur L de 200 mm (figure 1.11.5.). On marquera l'emplacement du renfort avant de procéder à son application pour assurer un bon alignement de celui-ci. Trois renforts identiques sont appliqués sur une même dalle support : pour chacun des procédés, trois essais de caractérisation seront donc au minimum réalisés. L'axe médian du renfort est perpendiculaire au bord de la dalle et situé au milieu de ce même côté. Le collage du renfort, ou l'imprégnation du tissu est réalisé conformément aux fiches techniques de mise en œuvre du procédé considéré. La largeur des renforts  $l_{ar}$  (figure 1.11.4.) peut être fixée aux valeurs données pour l'essai à double recouvrement (1.11.4), ou peut correspondre à celle du procédé, limitée toutefois à 100 mm. Dans le cas des essais de procédés de type stratifiés au contact, un dispositif additionnel provisoire de support sera positionné pour soutenir la partie du renfort qui n'est collé sur le support (Figure 1.11.5).

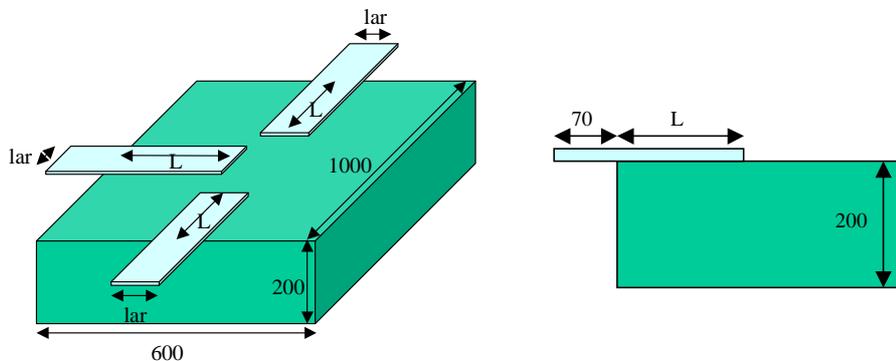


Figure 1.11.5. Schéma de la dalle support et dimensions

**Conditionnement de l'éprouvette**

Les éprouvettes sont ensuite conservées en conditions de laboratoire (que l'on vérifiera conformes à la fiche technique de mise en œuvre du procédé).

d) *Mode opératoire de l'essai à simple recouvrement*

**Principe du dispositif de chargement**

Un vérin annulaire transmet l'effort de traction au composite par l'intermédiaire d'une tige à laquelle est fixé un système de mors autobloquants. Un socle d'appui solidaire du montage et d'un bâti est en contact direct avec la dalle de béton. Pour ne pas perturber l'essai, une largeur de 40 cm est disponible entre les deux bras de la partie horizontale du socle d'appui. La complémentarité de la plaque verticale du bâti et des bras horizontaux permet de stabiliser l'axe de la sollicitation de traction et donc de maîtriser

les effets d'une éventuelle flexion hors du plan de cisaillement et/ou de l'axe de traction (figure 1.11.6.).

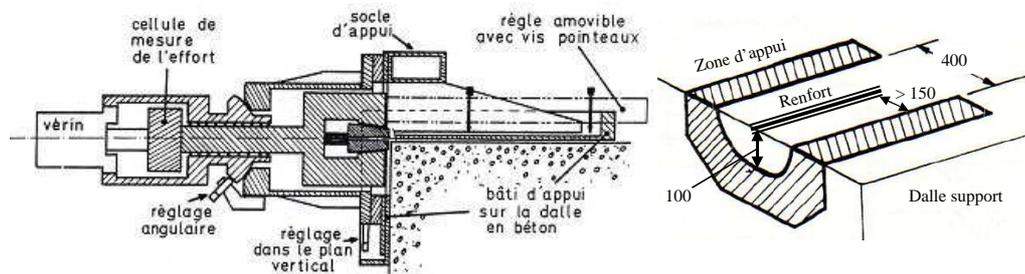


Figure 1.11.6. Schéma du dispositif d'essai et de la zone d'appui sur la dalle support

### Mise en place de la machine

Après avoir ouvert les mors et déplacé le vérin pour disposer d'une course maximale, la machine est positionnée horizontalement et verticalement à l'aide d'un outil de levage, puis elle est mise en contact avec la dalle. Une mise à niveau précise est ensuite réalisée à l'aide des vis de réglage pour obtenir un parallélisme rigoureux entre axe de traction et axe du renfort. Les mors sont ensuite fermés manuellement, et une précharge de 500 N à la vitesse de 75 N/s est réalisée pour assurer le serrage des mors.

### e) Conditions de chargement

L'essai est piloté en déplacement à une vitesse de 1 mm/min (soit  $17\mu\text{m/s}$ ). Ce paramètre d'asservissement correspond au déplacement du mors relativement à la dalle support.

### f) Instrumentation

Un capteur de déplacement de type LVDT (course de  $\pm 5$  mm de précision  $10^{-4}$  mm) est positionné pour mesurer le déplacement du mors relativement à la dalle support (figure 1.11.7.). Celui-ci permet de suivre l'évolution du déplacement que l'on note  $\Delta L_1'$ . Le déplacement  $\Delta L_2'$  (allongement de l'élément de renfort libre) est déterminé grâce aux caractéristiques élastiques du renfort et à la mesure de la longueur libre  $L_{\text{libre}}$  entre le bord du joint de colle et le mors. Le déplacement  $\Delta L'$  au niveau de l'interface entre le béton et le composite est donc déterminé par  $\Delta L' = \Delta L_1' - \Delta L_2'$ .

On enregistre, au cours de l'essai, l'évolution de l'effort appliqué et du déplacement du mors en fonction du temps.

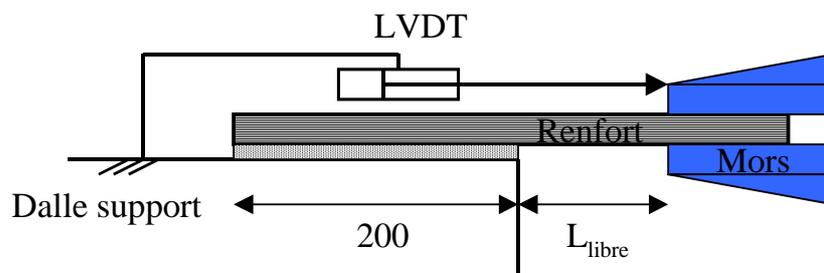


Figure 1.11.7. Schéma en coupe de l'échantillon avec instrumentation

g) *Expressions des résultats : Cas de l'essai à simple recouvrement*

On réalisera une exploitation des résultats identique à celle décrite dans le cas de l'essai à double recouvrement en 1.11.1. Les notations utilisées sont celles définies dans les paragraphes 1.11.1 f. Les modifications nécessaires sont décrites ci-après.

**Calcul de la contrainte moyenne**

Pour le calcul de la contrainte moyenne, F dans l'équation (1.11.2) correspond dans ce cas à l'effort appliqué lors de l'essai à simple recouvrement puisque dans le cas de l'essai à simple recouvrement, un seul joint est testé.

**Calcul de la déformation de cisaillement et du module de cisaillement**

Pour le calcul de la déformation de cisaillement et du module de cisaillement, on notera dans l'équation (1.11.3) que:

$$\Delta L' = \Delta L_1' - \Delta L_2' = (\Delta L_1 - \Delta L_2)/2 \quad (1.11.7)$$

**Calcul de la contrainte maximale en extrémité de plaque**

Pour le calcul de la contrainte maximale en extrémité de plaque, l'équation (1.11.5) du paragraphe 1.11.6 doit être adaptée à la géométrie de l'essai à simple recouvrement.

$$\tau_{ad,max} = \frac{F \cdot G_{ad}}{t_{ad} \cdot w} \left( \frac{1}{400 \cdot E_{cm} \cdot l_{ar}} + \frac{1}{2 \cdot E_f \cdot A_f} \right) \cdot \left( \tanh(w \cdot 100) + \frac{1}{\tanh(w \cdot 100)} \right) \text{ (MPa)}$$

avec 
$$w = \sqrt{\frac{G_{ad}}{t_{ad}} \left( \frac{l_{ar}}{A_f \cdot E_f} + \frac{1}{200 \cdot E_{cm}} \right)} \quad (1.11.8)$$

$\tau_{ad,max}$  : correspond à la contrainte moyenne ultime de cisaillement notée  $\tau_{ad,u}$  dans le présent guide.

La loi de comportement, la contrainte moyenne à la limite de linéarité, l'estimation de la longueur d'ancrage expérimentale, et l'évaluation de la contrainte à la rupture à l'interface sont ensuite effectuées selon la méthode décrite en 1.11.6.

**1.11.3 Compte-rendu**

**Présentation des résultats**

Le compte-rendu d'essai précise les valeurs définies par le paragraphe 6, ainsi que les courbes définies par la figure 1.11.4.

**Conditions d'essai**

La température ambiante ainsi que le taux d'hygrométrie lors de l'essai doivent être précisés.

**L'ensemble de la procédure expérimentale permet de déterminer les propriétés d'interface ou de la colle définies dans le tableau 1 paragraphe 1.2.**

$\tau_{ad,u}$	$\epsilon_{xy,adu}$	$G_{ad}$	$\tau_{ad,e}$	$\epsilon_{xy,ad}$
---------------	---------------------	----------	---------------	--------------------

### ***1.12 Détermination des propriétés d'adhérence du composite sur son support béton***

Nous suivons la procédure décrite dans la norme EN 1542 "Mesurage de l'adhérence par traction directe".

#### ***1.12.1 Principe de l'essai***

Le principe consiste à stabiliser le renfort ou à coller la plaque composite sur une dalle de béton présentant un état de surface conventionnel, puis, après durcissement, à arracher par traction directe des éléments cylindriques de produit.

#### ***1.12.2 Appareillage***

Appareil pour mesure de l'adhérence par traction directe par l'intermédiaire de pastilles métalliques collées de diamètre 50 mm.

#### ***1.12.3 Préparation de l'essai***

Le béton destiné à la confection des dalles est défini par la norme EN 1542 "Mesurage de l'adhérence par traction directe". Le béton doit avoir une résistance à la compression à 28 jours au moins égale à 40 MPa.

#### ***1.12.4 Préparation de la surface d'application***

Après la cure du béton, un traitement de surface défini par l'applicateur du procédé est alors effectué.

Les préparations des surfaces d'application sont définies par une conservation des dalles à 23°C et 50 % d'humidité pendant 7 jours avant l'application des renforts.

Dans le cas d'une application sur support humide, les dalles préparées sont sorties de l'eau une heure avant l'application et conservée à 23°C et 50 % d'humidité.

#### ***1.12.5 Application des produits***

Le mode opératoire pour l'application est celui défini par l'applicateur. Le renfort est appliqué en monocouche.

#### ***1.12.6 Carottage***

Le carottage des cinq pastilles est positionné selon la figure de la norme EN 1542 "Mesurage de l'adhérence par traction directe". Il doit pénétrer de 3 à 4 mm dans le béton support.

#### ***1.12.7 Préparation et collage des pastilles après carottage***

Les pastilles métalliques sont soigneusement nettoyées et dégraissées. Le collage intervient 24 h après carottage. La colle doit avoir des propriétés mécaniques supérieures à celles du produit sur le béton.

#### ***1.12.8 Essai de traction***

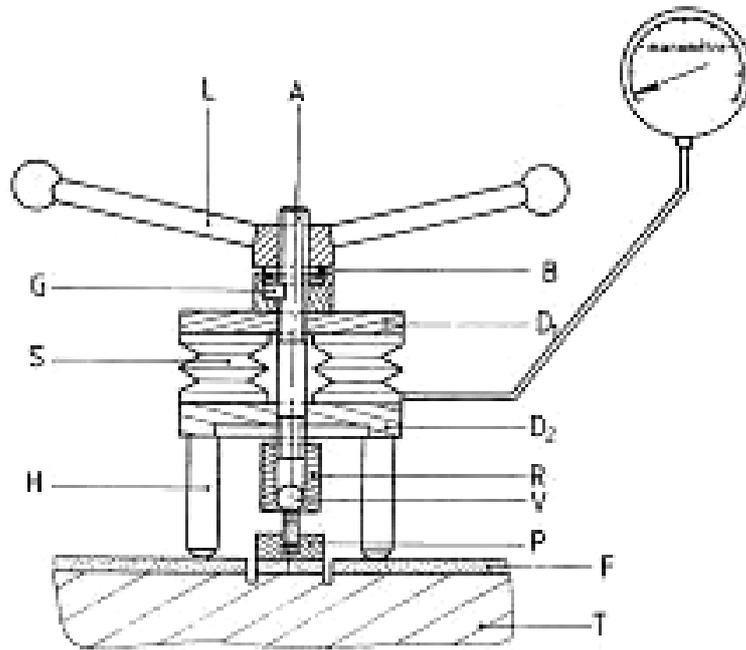
Le dynamomètre est mis en place au-dessus de la pastille, l'effort de traction est appliqué progressivement sur la pastille jusqu'à arrachement.

### 1.12.9 Expressions des résultats

Pour chaque pastille, retenir la charge maximale obtenue au cours de l'essai, exprimée en newtons. Pour chaque essai, calculer la moyenne des cinq mesures des efforts à rupture. Eliminer les valeurs s'écartant de  $\pm 20\%$  de la moyenne. La charge de rupture est la moyenne des résultats retenus. Au-delà de l'élimination de deux valeurs, l'essai est à refaire.

Calculer la contrainte moyenne d'adhérence comme le rapport de la charge moyenne de rupture à la surface nominale de la pastille. Le résultat est exprimé en  $N/mm^2$ .

Indiquer les positions des pastilles et le type de rupture obtenu défini par la norme EN 1542 "Mesurage de l'adhérence par traction directe".



#### Légende

S Soufflet	V Vis à tête sphérique se vissant dans la
D <sub>1</sub> Disque supérieur	L Volant à 4 branches
D <sub>2</sub> Disque inférieur	B Butée à essayer
H 3 pieds	F Produit à essayer
G Goupille empêchant la rotation de l'axe A	T Support béton
R Pièce rotule comportant une cavité sphérique à ouverture latérale	P Pastille

Figure 1.12.1. Coupe schématique d'un dynamomètre à soufflet

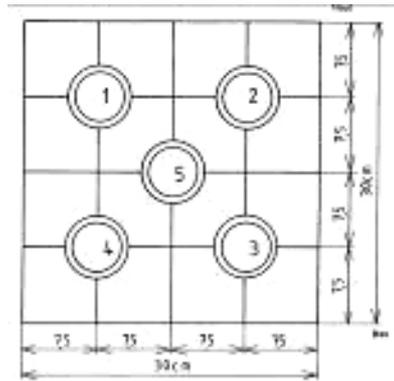


Figure 1.12.2. Schéma de carottage

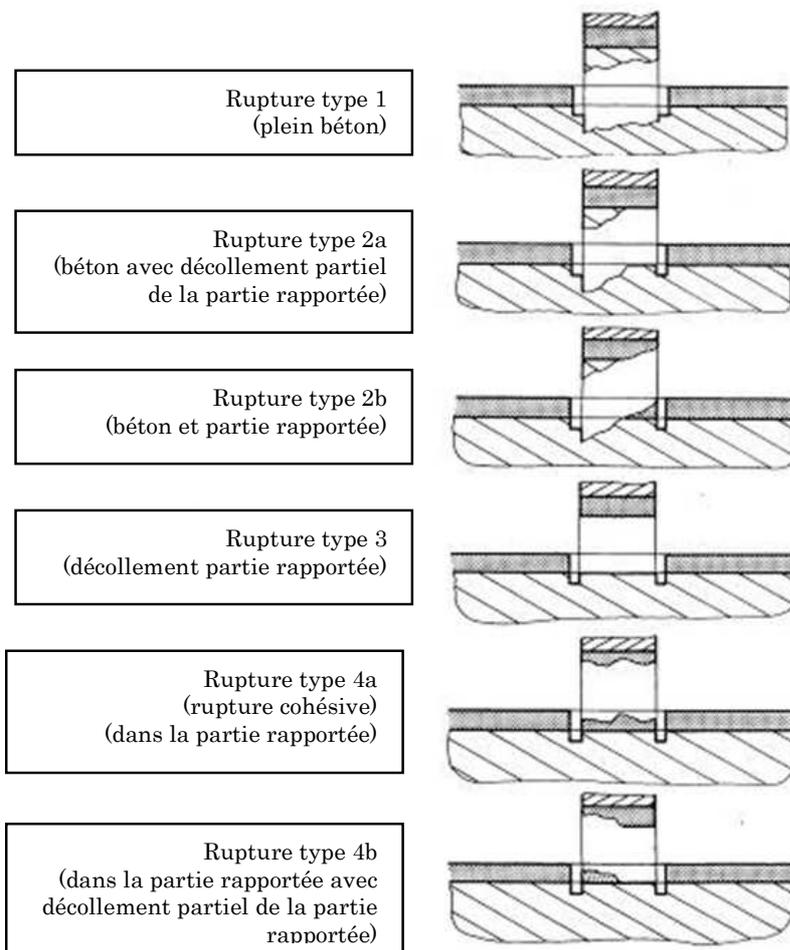


Figure 1.12.3. Différents types de rupture obtenus lors des essais de traction

### 1.12.10

La valeur moyenne  $f_{hm}$  devra être supérieure à 1,5 MPa pour concevoir le renforcement.

## **CHAPITRE II**

### **RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES MÉTHODES DE CALCUL APPLICABLES AUX OUVRAGES DE BÉTON ARMÉ OU PRECONTRAIT RÉPARÉS OU RENFORCÉS PAR MATÉRIAUX COMPOSITES COLLÉS**

2.1.	Généralités et limites d'utilisation	41
2.2.	Caractéristiques des matériaux	48
2.3.	Actions et sollicitations	55
2.4.	Justification des pièces prismatiques soumises à des sollicitations normales	56
2.5.	Expressions complémentaires pour l'évaluation des charges ultimes	65
2.6.	Justification vis-à-vis des sollicitations tangentes	69
2.7	Vérification de condition de non poinçonnement de dalle en béton armé	76
2.8	Justification concernant le confinement de poteaux	89

## 2.1 *Généralités et limites d'utilisation*

### 2.1.1 *Domaine d'application*

Le domaine d'application de ces recommandations couvre le calcul des structures en béton armé réparées ou renforcées avec des matériaux composites (fibres de carbone, fibres de verre et aramide) par collage ou par polymérisation directe sur le support.

Les recommandations sont également applicables aux structures en béton précontraint dans la mesure où l'ajout de matériaux composites vise uniquement à augmenter la quantité d'armatures passives (renforcement vis-à-vis de l'effort tranchant, robustesse au sens de l'eurocode 0, maîtrise de la fissuration en cas de précontrainte « partielle »).

Les méthodes de calcul présentées font référence aux documents réglementaires européens (Eurocodes et leurs annexes nationales) et s'inscrivent dans ce cadre.

Le support doit être sain et exempt de toute pathologie susceptible de dégrader la capacité de son parement à transmettre les efforts de cisaillement indispensables au fonctionnement du composite dans le temps. Ainsi, les supports souffrant de pathologies telles que l'alcali réaction, l'attaque sulfatique, une lixiviation, un écaillage avancé, une corrosion active pouvant provoquer un délaminage de la couche d'enrobage ne peuvent recevoir un renfort sans un examen et un traitement spécifique garantissant leur fonctionnement dans le temps.

Les produits composites concernés par ce texte doivent présenter un allongement à rupture en traction supérieur ou égal à 0,85%, afin de garantir un minimum de ductilité à la structure, provenant des armatures passives existantes, qui permet à l'ELU une redistribution salutaire des efforts vers les zones moins sollicitées.

Les colles utilisées doivent conduire dans tous les cas à une rupture cohésive dans le béton de support pour une large gamme de résistances (bétons C20/25 à C50/60 au sens de la norme NF EN206-1). Ce mode de rupture devra être systématiquement atteint pour toute la plage d'hygrométrie et de température préconisées dans son domaine d'emploi.

Pour certaines applications, les sollicitations d'origine thermique peuvent être prépondérantes. Ces cas ne sont pas traités ici.

Compte tenu des différents systèmes de renforcement, pour assurer une fiabilité et durabilité de la procédure de réparation, il est recommandé de consulter le chapitre I "Recommandations concernant la caractérisation des matériaux composites utilisés pour la réparation des structures en béton" et les chapitres III et IV : "Recommandations concernant la mise en œuvre *in situ* des matériaux composites pour le renforcement", "Recommandations concernant le contrôle *in situ* des matériaux composites pour le renforcement".

En conséquence, nous faisons état au paragraphe 2.2 des lois de comportement conventionnelles retenues pour le béton, l'acier, les composites et l'interface composite

béton en cherchant à respecter d'une part les normes et codes de référence (paragraphe 2.1.3) et celles établies au paragraphe 1.7.5 pour le composite et celles établies au paragraphe 2.2.4 pour l'interface.

La mise en équation de l'équilibre des sections fléchies reprend les mêmes hypothèses que celles retenues dans les règlements en vigueur (paragraphe 2.1.2) et les expressions de calcul proposées dans ce chapitre s'appuient sur des hypothèses d'adhérence parfaite entre composite et béton compte tenu des niveaux de contraintes de l'interface et du composite définies aux paragraphes 2.2.3 et 2.2.4. Par ailleurs, les déformations des sections et les diagrammes de répartition des contraintes normales qui en résultent sont développées suivant les mêmes hypothèses que celles retenues dans les Eurocodes.

Les règles de dimensionnement définies ci-après ne sont valables que pour les structures soumises à des conditions de températures tempérées.

A défaut de spécifications particulières de la part du fabricant, on retiendra une température de service continue (T) respectant la relation suivante :

$$-20^{\circ}\text{C} < T < T_g - 10^{\circ}\text{C}$$

$T_g$  : température de transition vitreuse qui devra être précisée soit par les fiches techniques des fournisseurs et applicateurs précisant les conditions de cure de leur système ou à défaut de mesure de ces données, cela fera l'objet d'un contrôle sur un polymère ayant subi les mêmes conditions de cure que celle de la réparation/ du renforcement *in situ*.

### **2.1.2 Normes de référence**

EN1990 : Mars 2003, Eurocode structuraux – Base de calcul des structures

EN 1990/A1/NA, Décembre 2007, Eurocode – Base de calcul des structures – Annexe nationale à la NF EN 1990/A1 :2006

EN1992-1-1 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour bâtiments d'octobre 2005 et son annexe nationale de mars 2007

EN1992-1-2 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton – Partie 1.2 : Calcul du comportement au feu d'octobre 2005 et son annexe nationale d'octobre 2007

EN1992-2 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton – Partie 2 : Ponts en béton – Calcul et dispositions constructives de mai 2006 et son annexe nationale d'avril 2007

Normes de caractérisation des matériaux : cf. chapitre I "Recommandations concernant la caractérisation des matériaux composites utilisés pour la réparation des structures en béton"

Normes de mise en œuvre ou de contrôle *in situ* : cf. chapitres III et IV "Recommandations concernant la mise en œuvre *in situ* des matériaux composites pour le renforcement" – "Recommandations concernant le contrôle *in situ* des matériaux composites pour le renforcement"

### 2.1.3 Notations

AFGC 2010	Définition
$A_c$	Aire d'une section de béton
$A_f$	Aire d'une section de composite
$A_p$	Aire d'une section d'acier de précontrainte
$A_s$	Aire d'une section d'acier tendue ou longitudinaux
$A_s'$	Aire d'une section d'acier comprimée
$A_{sy}$	Section d'aciers longitudinaux dans la direction y
$A_{sz}$	Section d'aciers longitudinaux dans la direction z
$C_{Rd,c}$	Coefficient défini par l'Eurocode 2
$D$	Diamètre d'un poteau
$E_{ad}$	Module d'élasticité de l'interface composite-béton en traction
$E_{ad,c}$	Module d'élasticité de l'interface composite-béton en compression
$E_c$	Module d'Young du béton
$E_f$	Module d'Young du composite
$E_p$	Module de confinement de la section Module d'Young de l'acier de précontrainte
$E_s$	Module d'Young de l'acier
$F_{ade}$	Effort de traction élastique maximum dans l'interface composite-béton
$F_f$	Effort dans le composite
$F_{f\ ELS}$	Effort repris par le composite à l'ELS (après la zone de transfert)
$F_{f\ ELU}$	Effort repris par le composite à l'ELU
$F_s$	Effort normal repris par les aciers passifs tendus
$F'_s$	Effort normal repris par les aciers passifs comprimés
$G_{ad}$	Module de cisaillement de l'interface composite-béton
$G_f$	Module de cisaillement plan du composite
$I$	Inertie homogénéisée de la section

$M_{Rd}$	Moment fléchissant
$M_{Rdc}$	Moment fléchissant repris par le béton
$M_{Rdf}$	Moment fléchissant repris par le composite
$M_{Rds}$	Moment fléchissant repris par les aciers passifs tendus
$N_{Ed}$	Effort normal appliqué à la section
$N_{Rd}$	Effort normal pouvant être repris par un poteau confiné
$R$	Rayon de courbure de la section
$R_f$	Résistance maximale à la traction de la section de composite
$T_g$	Température de transition vitreuse
$V_{Ed}$	Effort tranchant ou de poinçonnement appliqué à la section
$V_{Rd,c}$	Effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armatures d'effort tranchant
$V_{Rd,f}$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par le composite
$V_{Rd,max}$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par l'élément, avant écrasement des bielles de compression
$V_{Rd,s}$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par les armatures d'effort tranchant travaillant à la limite d'élasticité
$b$ ou $b_w$	Epaisseur brute de l'âme d'une poutre Grand coté d'un poteau
$c_1$	Dimension du poteau parallèlement à l'excentricité de la charge
$c_2$	Dimension du poteau perpendiculairement à l'excentricité de la charge
$d$	Distance entre le barycentre d'armatures tendues à la fibre extrême la plus comprimée
$2d$	Longueur utile du renforcement
$d_{eff}$	Hauteur utile moyenne
$d_x$	Hauteur utile dans la direction x
$d_y$	Hauteur utile dans la direction y
$d'$	Distance entre les aciers passifs et la fibre tendue
$f_{ad}$	Résistance à la traction de la colle ou la résine à l'interface composite-béton
$f_{cd}$	Résistance du béton en compression de calcul

$f_{cd,c}$	Résistance de calcul du béton confiné
$f_{cd,u,c}$	Résistance ultime de calcul du béton confiné
$f_{ck}$	Résistance caractéristique du béton en compression, mesurée sur cylindre à 28 jours
$f_{ck}$	Contrainte caractéristique à la compression du béton
$f_{ctk}$	Résistance caractéristique en traction directe du béton
$f_{fd,\theta}$	Résistance caractéristique du renfort composite, en fonction de l'orientation
$f_{fd}$	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELS
$f_{fu}$	Contrainte moyenne de traction à rupture du composite
$f_{fud}$	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELU
$f_{hm}$	Résistance moyenne du support en traction directe
$f_{pd}$	Résistance de calcul en traction des aciers de précontrainte
$f_{pk}$	Résistance caractéristique en traction des aciers de précontrainte
$f_{p0.1k}$	Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0.1% des aciers de précontrainte
$f_i$	Pression de confinement ultime
$f_{yd}$	Limite d'élasticité de calcul de l'acier de béton armé
$f_{yk}$	Limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé
$h$	Épaisseur d'une membrure de béton Petit coté d'un poteau ou épaisseur d'une dalle
$h_f$	Hauteur totale du composite
$k_c$	Coefficient de forme de la section
$k_h$	Coefficient de forme du composite
$l_{anc}$	Longueur d'ancrage du composite
$l'_{anc}$	Longueur de transfert majorée
$l_{anc,d}$	Longueur d'ancrage de calcul du composite
$l_{anc,exp}$	Longueur d'ancrage du composite déduite des essais
$l_{anc,th}$	Longueur d'ancrage théorique du composite
$l_{anc,Vu}$	Longueur d'ancrage du composite choisie pour le calcul à l'effort tranchant
$l_{rec}$	Longueur de recouvrement du composite
$l_{trans}$	Longueur de transfert

$n$	Coefficient d'équivalence acier-béton
$n_f$	Coefficient d'équivalence composite-béton
$n_p$	Nombre de plis de composite
$s_f$	Espacement entre les bandes de composite
$s$	Espacement entre cadres transversaux
$t_{ad}$	Épaisseur de l'interface composite-béton
$t_f$	Épaisseur du composite
$t_{f,ELU}$	Épaisseur minimale de composite pour résister en flexion à l'ELU
$u_{out,ef}$	Contour de contrôle extérieur
$u_1$	Périmètre du contour de contrôle de référence
$u_{I,f}$	Largeur de bandes sollicitées
$v_{add}$	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELS
$v_{adud}$	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELU
$v_c$	Taux de cisaillement moyen à l'ELS dans le béton d'enrobage
$v_{cu}$	Taux de cisaillement moyen à l'ELU dans le béton d'enrobage
$v_{Ed}$	Taux de cisaillement moyen à l'ELU
$v_{min}$	Contrainte définie par l'Eurocode 2
$v_{Rd,c}$	Contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle sans armatures de poinçonnement le long de la section de contrôle considérée
$v_{Rd,cf}$	Contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle sans armatures de poinçonnement renforcée par matériaux composites le long de la section de contrôle considérée
$v_{Rd,f}$	Contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement de la partie renforcement composite le long de la section de contrôle considérée
$y$	Profondeur de l'axe neutre pour une section calculée vis-à-vis de l'état limite de service
$w_f$	Largeur de la bande de composite
$z_f$	Bras de levier du composite
$z_s$	Bras de levier des aciers passifs
$\epsilon_{xy,adu}$	Déformation limite moyenne de cisaillement de l'interface
$\epsilon_{xy,ade}$	Déformation limite moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique
$\alpha$	Coefficient d'efficacité du confinement

$\alpha_{ad}$	Coefficient de réduction au niveau de l'interface pour tenir compte des effets différés
$\alpha_f$	Coefficient de réduction pour tenir compte de l'effet long terme
$\alpha_v$	Rapport des longueurs d'ancrage (cas de l'ancrage partiel)
$\beta$	Angle d'inclinaison du composite par rapport à la fibre moyenne
$\beta$	Coefficient de positionnement de la charge dans le cas du poinçonnement
$\epsilon_c$	Déformation du béton
$\epsilon_{c2}$	Déformation du béton atteinte pour la contrainte de compression maximale
$\epsilon_{cu2}$	Déformation ultime du béton en compression
$\epsilon_f$	Déformation du composite
$\epsilon_{fd}$	Déformation limite du composite dans l'équilibre de section prenant en compte la présence d'aciers passifs
$\epsilon_{fu}$	Déformation ultime du composite
$\epsilon_{fud}$	Déformation ultime de calcul du composite
$\Delta\epsilon_f$	Différentiel de déformation au sein du composite
$\epsilon_s$	Déformation des aciers passifs tendus
$\epsilon'_s$	Déformation des aciers passifs comprimés
$\epsilon_{s0}$	Déformation des aciers passifs au moment de la réparation
$\epsilon_{se}$	Déformation limite élastique des aciers passifs (= $f_{yd} / E_s$ )
$\epsilon_{sud}$	Déformation ultime de calcul de l'acier
$\epsilon_{suk}$	Déformation ultime caractéristique de l'acier
$\gamma_{ad}$	Coefficient partiel de sécurité sur l'adhésif
$\gamma_c$	Coefficient partiel de sécurité sur le béton
$\gamma_f$	Coefficient partiel de sécurité sur le composite
$\gamma_s$	Coefficient partiel de sécurité sur l'acier
$\gamma_{td}$	Coefficient partiel de sécurité sur le béton à l'arrachement
$\psi$	Coefficient prenant en compte l'épaisseur de renfort
$\chi$	Coefficient fonction du type de renfort
$\gamma_\lambda$	Coefficient de sécurité au flambement
$\psi_f$	Coefficient de performance

$\rho_l$	Taux de ferrailage longitudinal (=A <sub>s</sub> /A <sub>c</sub> )
$\rho_{ly}$	taux de ferrailage longitudinal dans la direction y
$\rho_{lz}$	Taux de ferrailage longitudinal dans la direction z
$\sigma_{ad}$	Contrainte normale à l'interface
$\sigma_f$	Contrainte de traction dans le composite
$\sigma_s$	Contrainte normale dans les aciers passifs
$\tau_{ad}$	Contrainte de cisaillement à l'interface
$\tau_{ad,e}$	Contrainte moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique
$\tau_{ad,u}$	Contrainte moyenne ultime de cisaillement à l'interface
$\tau_{fd}$	Contrainte de cisaillement interlaminaire du composite
$\theta$	Angle d'inclinaison des fissures par rapport à la fibre moyenne
$\nu_f$	Coefficient de poisson du composite
$\theta$	Angle de poinçonnement

## 2.2 Caractéristiques des matériaux

Les lois de comportement retenues pour le béton et l'acier sont celles figurant dans l'Eurocode 2.

### 2.2.1 Béton

Les contraintes limites en compression du béton pour le calcul des sections sont données par (EC2-1-1 3.1):

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{pour } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2} \quad (2.2.1)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{pour } \epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu2} \quad (2.2.2)$$

avec :

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

$\gamma_c = 1,5$  pour les combinaisons fondamentales et 1,2 pour les combinaisons accidentelles

$n$  est l'exposant, indiqué dans le Tableau 2.2.1

$\epsilon_{c2}$  est la déformation atteinte pour la contrainte maximale, indiquée dans le Tableau 2.2.1

$\epsilon_{cu2}$  est la déformation ultime, indiquée dans le Tableau 2.2.1.

Dans le cas de l'analyse structurale non linéaire :

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (2.2.3)$$

avec :

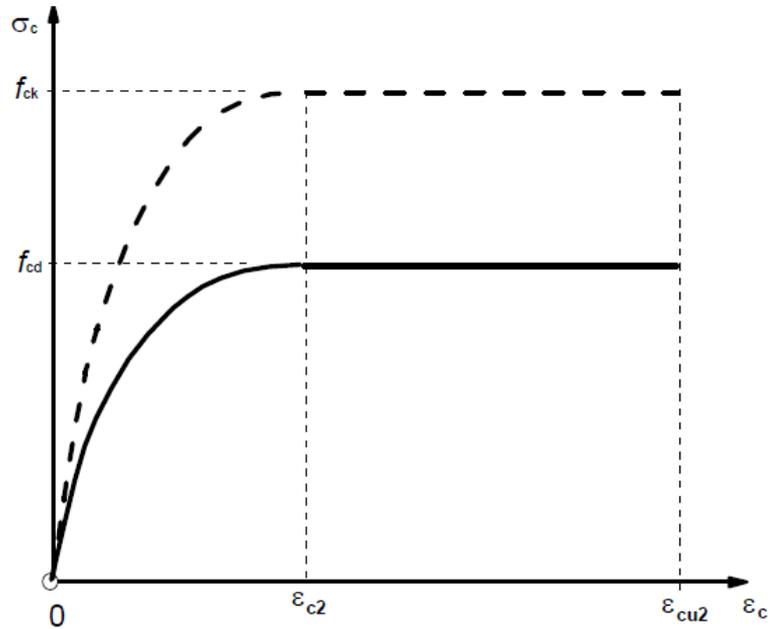
$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$

$\varepsilon_{c1}$  est la déformation au pic de contrainte, indiquée dans le Tableau 2.2.1

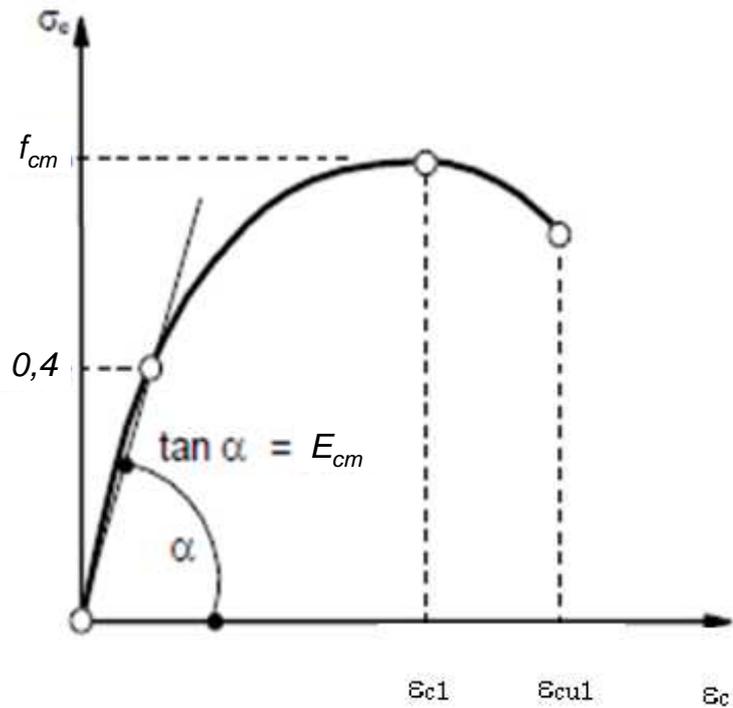
$$k = 1,05 E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}| / f_{cm} \quad (f_{cm} \text{ selon Tableau 2.2.1}).$$

Classes de résistance du béton														
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,99}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
$\varepsilon_{c1}$ (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
$\varepsilon_{cu1}$ (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
$\varepsilon_{c2}$ (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
$\varepsilon_{cu2}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
$\eta$	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
$\varepsilon_{c3}$ (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
$\varepsilon_{cu3}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Tableau 2.2.1. Caractéristiques du béton



(a) Loi compression béton (EC2)



(b) Loi compression du béton pour les calculs non linéaires (EC2)

Figure 2.2.1. Lois de comportement du béton

### 2.2.2 Aciers

Dans le cas des aciers passifs naturels ou tréfilés (EC2-1-1 3.2) :

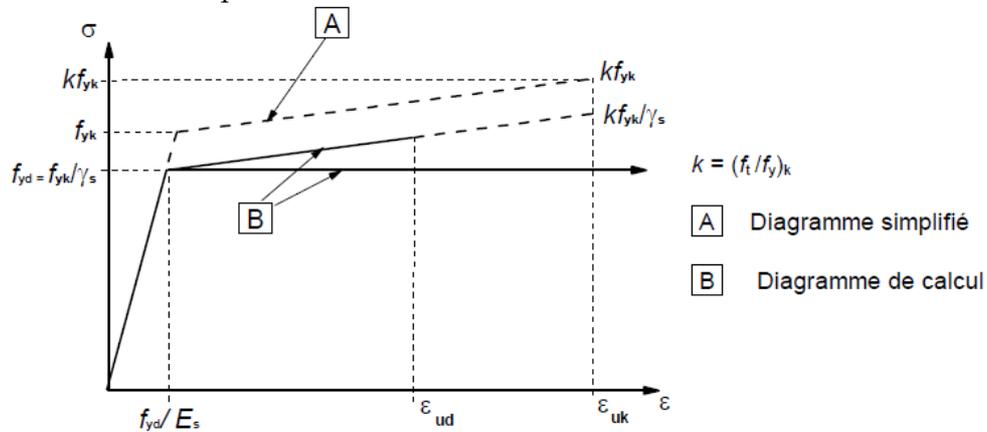


Figure 2.2.2. Loi de comportement de l'acier (EC2)

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (2.2.4)$$

avec  $\gamma_s = 1,15$  aux ELU combinaisons fondamentales  
 $\gamma_s = 1$  aux ELU combinaisons accidentelles

Les valeurs de k sont données dans l'annexe C de l'Eurocode 2 en fonction du type d'aciers mis en oeuvre (différentes classes de ductilité).

Dans le cas des aciers de précontrainte, plusieurs lois de comportement peuvent être utilisées (EC2-1-1 3.3) :

- la loi bilinéaire à palier horizontal [EC2-1-1 3.3.6 Fig.3.10] ,
- la loi bilinéaire avec raffermissement [EC2-1-1 3.3.6 Fig.3.10] ,
- une loi représentant le diagramme réel des aciers, sous réserve de lui appliquer le

coefficient  $\frac{1}{\gamma_s}$  au delà de  $f_{p0,1k}$  [EC2-1-1 3.3.6(7)]. Pour les torons, la loi du règlement

antérieur (conforme à la figure [EC2-1-1 3.3.6 Fig.3.9] peut donc être reprise, elle est mentionnée sur la figure suivante :

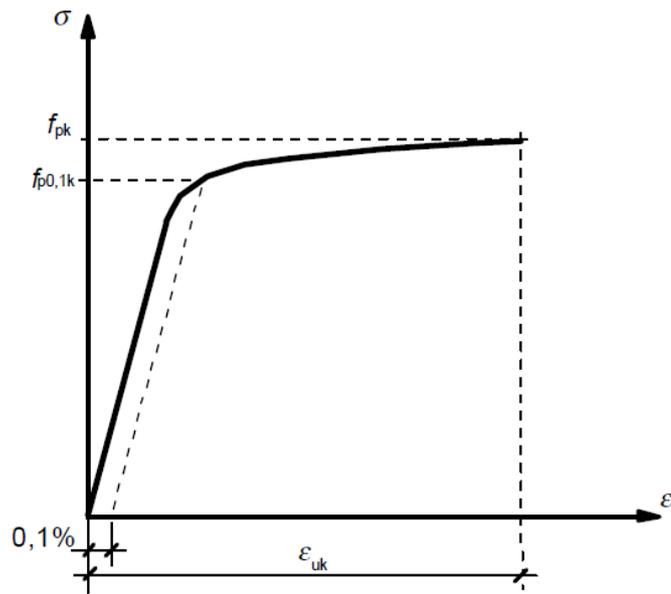
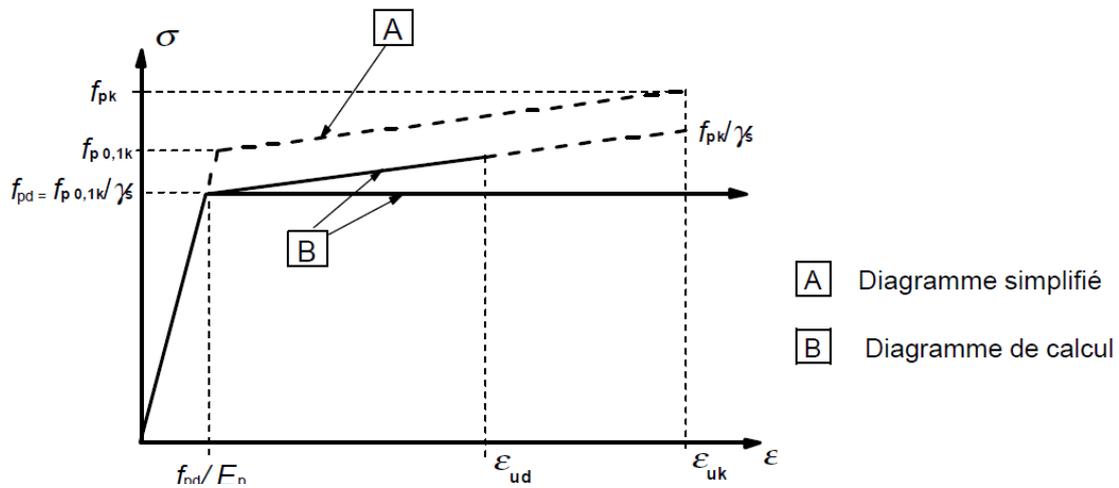


Figure 2.2.3. Loi de comportement des aciers de précontrainte (EC2)

La résistance de calcul des aciers de précontrainte dans le cas d'utilisation de la loi avec palier horizontal est donnée par :

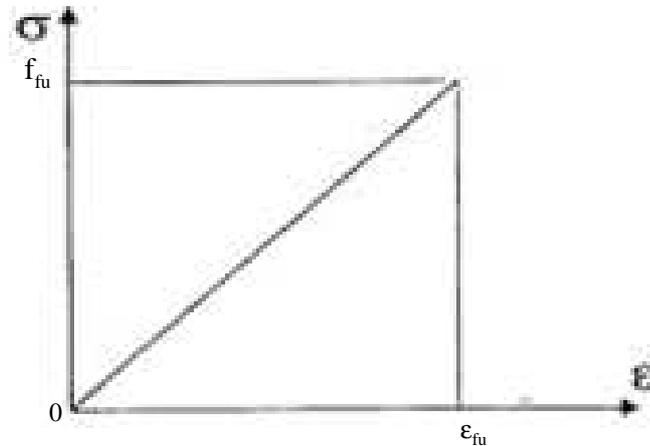
$$f_{pd} = \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_s} \quad (2.2.5)$$

avec  $\gamma_s$  coefficient partiel de l'acier de précontrainte [EC2-1-1/AN 2.4.2.4(2)] de valeur 1,15 en situations durable et transitoire et 1,0 en situation accidentelle.

Dans le cas d'utilisation de la loi bi-linéaire avec raffermissement la valeur limite de résistance est définie par l'allongement maximal de calcul  $\epsilon_{ud}$  dont la valeur recommandée vaut 2%.

### 2.2.3 Composites

Dans le cas des matériaux composites unidirectionnels :



(avec  $f_{fu}$  déterminé au chapitre 1 paragraphe 1.7)

*Figure 2.2.4. Loi de comportement du composite*

En notant  $f_{fu}$  la résistance à la traction du composite, on retiendra :

$$f_{fud} = \frac{\alpha_f f_{fu}}{\gamma_{fd}} \quad (2.2.6) \quad \text{et} \quad f_{fd} = \frac{\alpha_f f_{fu}}{\gamma_{fd}} \quad (2.2.7)$$

$f_{fu}$  est une valeur moyenne à rupture.

Sauf justifications particulières, les vérifications seront effectuées dans le cas général avec  $\alpha_f = 0,65$  qui prend en compte les effets liés au vieillissement des matériaux organiques et la diminution de leurs caractéristiques mécaniques avec le temps.

Le coefficient de sécurité  $\gamma_{fd}$  dépend du type de matériau employé et des combinaisons d'actions envisagées.

A défaut de coefficients justifiés par le fabricant, on retiendra :

Matériau composite	$\gamma_{fd}$		
	ELS	ELU	
		fondamental	Accidentel
Pultrudé carbone-époxy	1,4	1,25	1
Stratifié in-situ carbone-époxy	2	1,4	1,1
Stratifié in-situ verre-époxy	2,5	1,6	1,3

### 2.2.4 Loi de comportement de l'interface composite-béton ou de la colle

Contrainte de cisaillement

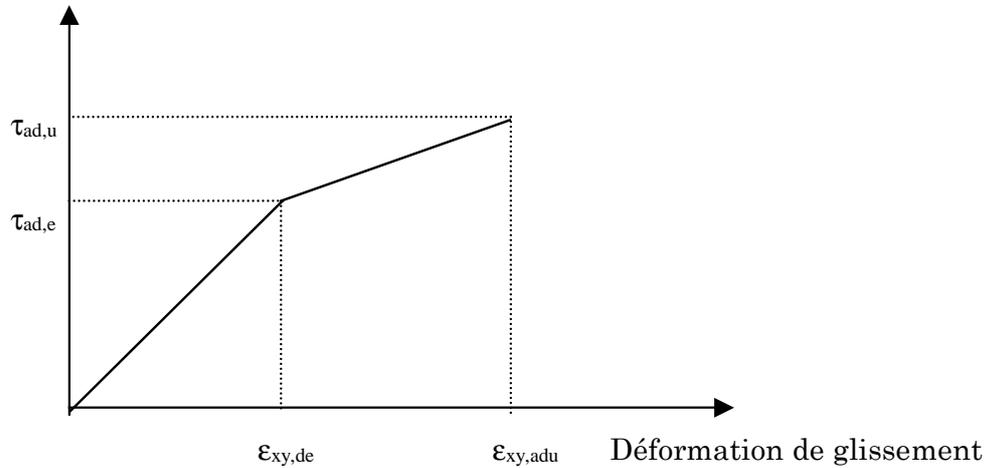


Figure 2.2.5. Loi de comportement de l'interface composite-béton

La contrainte limite de cisaillement de l'interface composite-béton ou de la colle est définie comme suit :

$$v_{add} = \min \left( \alpha_{ad} * \frac{\tau_{ad,e}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{ctm}}{\gamma_{td}} \right) \quad (2.2.8)$$

$f_{ctm}$  est la résistance moyenne à la traction du support béton.

Elle devra être contrôlée *in situ* (pastillage), et ne devra pas être inférieure à 1,5 MPa.

ELU  $\gamma_{td} = 1$  (mêmes valeurs pour les combinaisons fondamentales et accidentelles)

ELS  $\gamma_{td} = 1,5$

$\tau_{ad,e}$  est la contrainte de cisaillement moyenne déterminée en 1.11.

$\alpha_{ad} = 0,8$  si  $T_g > 50^\circ\text{C}$  ( $T_g$  température de transition vitreuse)

$\alpha_{ad} = 0,4$  si  $T_g \leq 50^\circ\text{C}$

La valeur du coefficient de sécurité  $\gamma_{ad}$  sur l'interface est donnée dans le tableau suivant :

Matériau	$\gamma_{ad}$		
	ELS	ELU	
		fondamental	Accidentel
Pultrudés	2	1,4	1,1
Stratifiés in-situ	1,4	1,25	1

Dans le cadre d'un projet de renforcement, en l'absence de résultats complémentaires ou de systèmes d'ancrage spécifiques des valeurs de résistance provisoire  $v_{adu,d}$  égales à 1,5 MPa à l'ELU et à 1 MPa à l'ELS peuvent être retenues.

*Commentaires : Les coefficients de pondération proposés en 2.2.2 et 2.2.3 pourront être modifiés dans l'éventualité où, suivant les procédures d'essais définies par les normes en vigueur (fluage, fluage en température, vieillissement ultra-violet, vieillissement hygrométrique...) des résultats expérimentaux établis par des laboratoires qualifiés permettent de justifier de nouvelles valeurs. En particulier, les procédés disposant d'un Avis Technique pourront conserver les contraintes limites ELS et ELU du renfort préconisées dans ces documents (le coefficient  $\alpha$  sera alors adapté en conséquence, sans pouvoir dépasser 1). En l'absence de résultats complémentaires, les chargements de fatigue ne sont pas couverts par ces recommandations.*

### 2.3 Actions et sollicitations

Pour le calcul des actions et sollicitations, il faut considérer un état 0 qui correspond à l'état de la structure au moment de l'application du matériau composite.

Les combinaisons d'actions à prendre en considération sont celles des Eurocodes 0 et 1. Les combinaisons d'actions à prendre en considération sont dans le cas général :

ELS Combinaison caractéristique

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.3.1)$$

ELU Combinaison fondamentale pour les situations de projet durables et transitoires :

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.3.2)$$

ELU Combinaison fondamentale pour les situations de projet accidentelles

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2.3.3)$$

ELU Combinaison fondamentale pour les situations de projet sismiques

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2.3.4)$$

G : actions permanentes

P : actions de précontrainte

Q : actions variables

$A_d$  : actions accidentelles

$A_{ed}$  : actions sismiques

$\gamma, \psi$  : coefficients sur les actions

*Commentaire : Dans un premier temps, le prédimensionnement des renforts composites sera fait sans considérer les phénomènes de fluage et de retrait.*

## **2.4. Justification des pièces prismatiques soumises à des sollicitations normales**

### **2.4.1 Règles générales**

Le présent chapitre s'inspire largement de l'Eurocode 2 tout en précisant les dispositions de calcul particulières au cas des structures renforcées par adjonction de plaques ou tissus composites. Il s'applique aux pièces prismatiques usuellement désignées par les termes de poutres ou de dalles dont les sections transversales sont soumises à des sollicitations normales issues de la flexion (moment et effort normal). Ce chapitre traite donc exclusivement des cas de la flexion simple, composée ou déviée et exclut le cas de la compression simple.

Les justifications doivent obligatoirement concerner l'état limite ultime et l'état limite de service.

### **2.4.2 Etat limite ultime de résistance**

#### **Remarque préalable**

Les hypothèses ci-après supposent que les aciers passifs ou de précontrainte sont totalement pris en compte, ce qui est généralement le cas pour les renforcements, mais pas nécessairement pour les réparations. Les sections et les caractéristiques des armatures et du béton seront déterminées après diagnostic de l'ouvrage.

Les paramètres à considérer dans le cadre du diagnostic sont en particulier :

- leur section résiduelle dans le cas de pertes de section
- leur aptitude à se déformer dans le domaine plastique
- leur endommagement

#### **Principes et hypothèses de calcul**

Les sollicitations de calcul des Eurocodes 0 et 1 ne doivent pas dépasser dans le sens défavorable les sollicitations limites ultimes résultant des règles énoncées dans les paragraphes qui suivent. Les hypothèses de calcul sont énumérées ci-dessous :

- les sections droites restent droites ;
- pas de glissement relatif entre les armatures métalliques ou composites et le béton (sauf dans le cas d'une précontrainte non-adhérente) ;
- la résistance à la traction du béton est négligée ;
- la résistance à la compression du composite est négligée ;
- les diagrammes contrainte – déformation de calcul du béton, de l'acier passif et de précontrainte et du composite considérés sont ceux du chapitre 2.2 "Caractéristiques des matériaux";
- les déformations des sections sont limitées pour le raccourcissement unitaire du béton à 0,35%, pour l'allongement unitaire de l'acier à 4,5% si la loi de comportement avec palier plastique écrouissable est choisie, pour l'allongement des aciers de précontrainte à 2% et pour l'allongement unitaire du renfort composite à  $\epsilon_{fud} = \text{Min}\{\epsilon_{fud} / E_f ; 0,85\}$  ;

- on peut supposer concentrée en son centre de gravité la section d'un groupe de plusieurs barres de ferrailage ou bandes de renfort composite, pourvu que l'erreur commise sur les déformations unitaires ne dépasse pas 5%. On ne peut en aucun cas regrouper des aciers et des composites ;
- la totalité des charges est prise en compte (pas de phasage).

### Diagramme des déformations limites de la section

Les vérifications sont conduites en accord avec le diagramme des trois pivots de l'Eurocode 2, issu des déformations limites fixées pour les matériaux et les hypothèses ci-dessus, en ajoutant un pivot relatif au matériau composite.

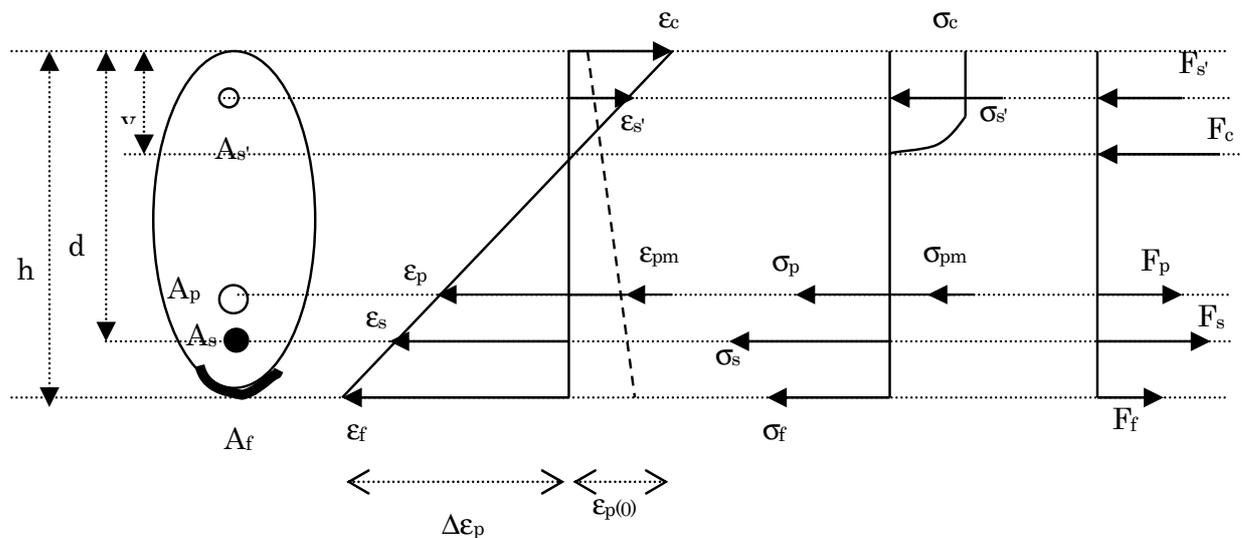


Figure 2.4.1. Diagramme des déformations limites d'une section

L'utilisation du diagramme rectangle simplifié en substitution de la loi parabole - rectangle est tolérée.

Sachant que  $\epsilon_{fid} < 10 \%$ , déformation ultime des aciers à l'ELU, on introduit la notion du pivot D (ou pivot A réduit), qui correspond à l'atteinte de l'allongement ultime du composite,  $\epsilon_{fid}$ .

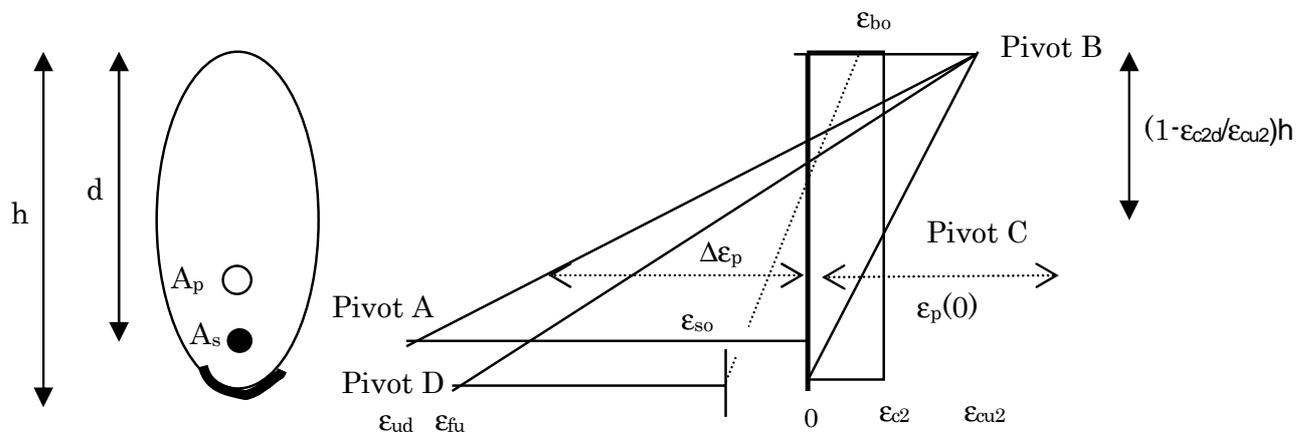


Figure 2.4.2. Diagramme pivot D

Pivot A : limite de la déformation des aciers passifs (s'il existe) ou des aciers de précontrainte au delà de la décompression du béton  
 Pivot B : limite de déformation du béton pour les pièces fléchies  
 Pivot C : limite de déformation du béton en compression pure  
 Pivot D : limite de déformation du composite  
 $\epsilon_{bo}$  : déformation du béton au moment de la réparation  
 $\epsilon_{so}$  : déformation des aciers au moment de la réparation  
 $\epsilon_{fud}$  : déformation ultime du composite pour le calcul  
 $\epsilon_{ud}$  : déformation ultime de calcul de l'acier  
 $\epsilon_{c2}$  : déformation atteinte pour la contrainte maximale en compression du béton  
 $\epsilon_{cu2}$  : déformation ultime en compression du béton

**Exemple : calcul simplifié d'une section rectangulaire en béton armé sans acier comprimé en flexion simple**

On considère, en première approximation, que la déformation du composite est supérieure de 10% par rapport à celle des aciers pour une condition d'enrobage classique.

**1<sup>er</sup> cas : pivot A ou B**

$$1,10 \cdot (10 \text{ ‰} - \epsilon_{so}) < \epsilon_{fud} \quad (2.4.1)$$

Moment rupture poutre pivot B (diagramme de déformation AB)

$$M_{Rdc} = 0,8 y \cdot f_{cd} \cdot b \cdot (d - 0,4 y) \quad \text{avec } y = 0,259 d \quad (2.4.2)$$

Moment de rupture poutre (droite de déformation passant par le pivot A)

Moment repris par les armatures tendues supposées plastifiées :

$$M_{Rds} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z_s \quad \text{avec } z_s \approx 0,9 d \quad (2.4.3)$$

Moment repris par les composites :

$$M_{Rdf} = A_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{fd} \cdot z_f, \quad \text{avec } z_f \approx d \quad (2.4.4)$$

$$\text{et avec } \epsilon_{fd} = \min \{ 1,10 \cdot (10 \text{ ‰} - \epsilon_{so}); \epsilon_{fud} \} \quad (2.4.5)$$

Moment ultime de la poutre réparée

$$M_{Rd} = \min \{ M_{Rdc}; M_{Rds} + M_{Rdf} \} \quad (2.4.6)$$

**2<sup>ème</sup> cas : pivot B ou D, aciers plastifiés**

$$\epsilon_{se} = \frac{f_{yk} / \gamma_s}{E_s} = 2,17 \text{ ‰} < \epsilon_{fud} < 1,10 \cdot (10 \text{ ‰} - \epsilon_{so}) \quad (2.4.7)$$

$$\text{moment repris par aciers tendus :} \quad M_{Rds} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z_s \quad (2.4.8)$$

$$\text{moment repris par plaques composites :} \quad M_{Rdf} = A_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{fd} \cdot z_f \quad (2.4.9)$$

$$\text{moment ultime poutre réparée :} \quad M_{Rd} = \min \{ M_{Rdc}; M_{Rds} + M_{Rdf} \} \quad (2.4.10)$$

**3<sup>ème</sup> cas : pivot B ou D, aciers passifs non plastifiés**

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{so} + 0,91 \varepsilon_{fud} < \varepsilon_{se} = \frac{f_{yk} / \gamma_s}{E_s} \quad (2.4.11)$$

moment repris par aciers tendus :  $M_{Rds} = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \cdot z_s$  (2.4.12)

moment repris par plaques composites :  $M_{Rdf} = A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot z_f$  (2.4.13)

moment ultime poutre réparée :  $M_{Rd} = \min \{ M_{Rdc}; M_{Rds} + M_{Rdf} \}$  (2.4.14)

### 2.4.3 Etat limite de service

#### Remarque préalable :

Les hypothèses ci-après supposent que les aciers passifs ou de précontrainte sont totalement pris en compte, ce qui est généralement le cas pour les renforcements, mais pas nécessairement pour les réparations. Les sections et les caractéristiques des armatures et du béton seront déterminées après diagnostic de l'ouvrage

Les paramètres à considérer dans le cadre du diagnostic sont en particulier :

- leur section résiduelle dans le cas de pertes de section
- leur endommagement

#### Principes et hypothèses de calcul

Les vérifications à effectuer portent sur :

- une limite de la contrainte de compression du béton à  $\sigma_{clim} = 0,45 f_{ck}$  sous combinaison quasi-permanente (EC2-1-1 3.1.4(4));
- une limite de la contrainte de traction des aciers passifs à  $\sigma_{slim} = 0,8 f_{yk}$  sous combinaison caractéristique (EC2-2 2.7.2(5)); et une limitation de contrainte de traction à  $\sigma_{pm} = 0,8 f_{pk}$  dans le cas de la précontrainte adhérente (EC2-1-1/AN 7.2(5)).
- une limite de contrainte dans le composite à  $\sigma_{flim} = \text{Min} \{ f_{fd}; 0,9 \sigma_{slim} \}$ .
- une maîtrise de la fissuration. La fissuration doit être limitée de telle sorte qu'elle ne porte pas préjudice au bon fonctionnement ou à la durabilité de la structure ou encore qu'elle ne rende pas son aspect inacceptable. Selon l'Eurocode 2, la maîtrise de la fissuration se fait par un calcul d'ouverture de fissures et la mise en place d'un ferrailage minimum en zone tendue sous combinaison caractéristique.

Le calcul d'ouverture des fissures permet notamment d'éviter la pénétration des agents agressifs. Si le renfort composite est appliqué sur la totalité de la partie de la structure fissurée, la pénétration des agents agressifs n'est pas possible. La vérification à l'ELS se limite alors à vérifier les contraintes limites citées ci-dessus pour les matériaux ( $\sigma_{slim} = 0,8 f_{yk}$ ;  $\sigma_{pm} = 0,8 f_{pk}$ ;  $\sigma_{clim} = 0,45 f_{ck}$ ;  $\sigma_{flim} = \text{Min} \{ f_{fd}; 450 \text{ MPa} \}$ ). Si le renfort composite ne recouvre pas toute la section, la question de la maîtrise de leur ouverture se pose et devra être justifiée.

Concernant le ferrailage minimum, le composite mis en œuvre doit compenser l'éventuel déficit observé.

Les sollicitations de calcul obtenues en application des Eurocodes 0 et 1 ne doivent pas dépasser dans le sens défavorable les sollicitations limites de service résultant des règles énoncées dans les paragraphes qui suivent. Les hypothèses de ce calcul sont énumérées ci-dessous :

- les sections droites restent droites ;
- pas de glissement relatif entre les armatures métalliques ou composites et le béton (sauf dans le cas de la précontrainte non-adhérente) ;
- la résistance à la traction du béton est négligée ;
- la résistance à la compression du composite est négligée ;
- les diagrammes contrainte – déformation de calcul du béton, des aciers passifs et de précontrainte et du composite restent parfaitement élastiques avec les limitations citées ci-dessus pour les contraintes ;
- les contraintes calculées pour chaque matériau doivent tenir compte du phasage de construction et de réparation ou renforcement avec les charges et sections respectives ;
- on peut supposer concentrée en son centre de gravité la section d'un groupe de plusieurs barres de ferrailage ou bandes de renfort composite, pourvu que l'erreur commise sur les déformations unitaires ne dépasse pas 5 %. On ne peut en aucun cas regrouper des aciers et des composites.
- On peut considérer que la position de l'axe neutre ne varie pas avant et après renforcement, ce qui permet de superposer les contraintes calculées sous le torseur avant renforcement et sous le torseur après renforcement, si les conditions suivantes sont respectées :
  - la distance entre la position  $y_1$  de l'axe neutre avant renforcement et la position  $y_2$  de l'axe neutre après renforcement est inférieure au dixième de la hauteur de la section
  - la contrainte de compression totale obtenue dans le béton ne dépasse pas  $0,5 f_{cd}$ .

Dans le cas contraire, un calcul précis de l'état d'équilibre de la section des contraintes doit être réalisé en tenant compte du phasage.

### Diagramme des déformations limites de la section

Dans le cas où la position de l'axe neutre ne varie pas, l'équilibre de la section se traduit par le diagramme suivant :

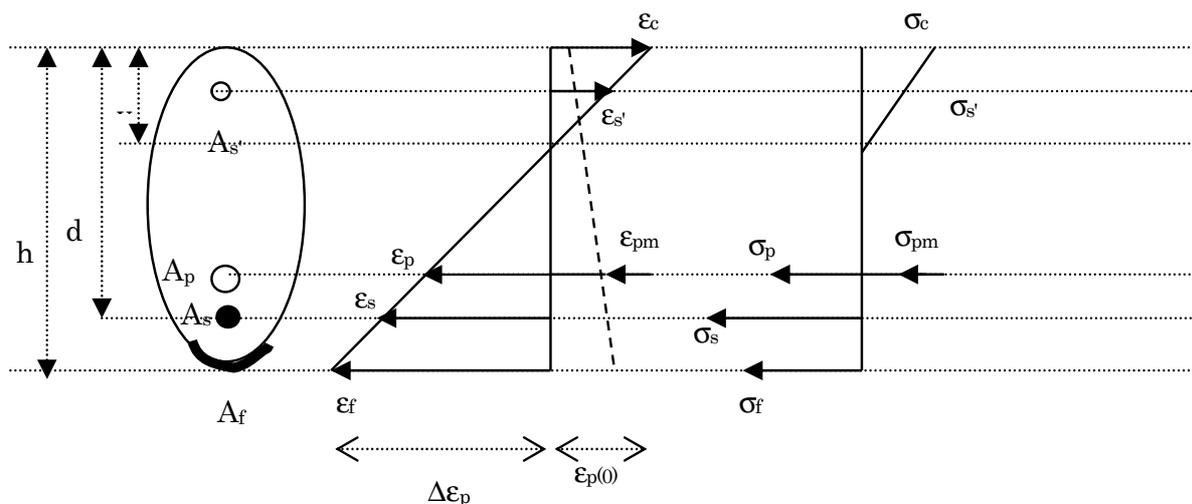


Figure 2.4.3. Diagramme des déformations et des contraintes à l'ELS

Les vérifications sous les torseurs de charges existantes au cours du renforcement  $\{N_1 ; M_1\}$  et des charges supplémentaires apportées après renforcement  $\{N_2 ; M_2\}$  s'écrivent :

$$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} \leq \sigma_{slim} \quad (2.4.15)$$

$$\sigma_c = \sigma_{c1} + \sigma_{c2} \leq \sigma_{clim} \quad (2.4.16)$$

$$\sigma_f \leq \sigma_{flim} \quad (2.4.17)$$

Ce que traduit le diagramme suivant :

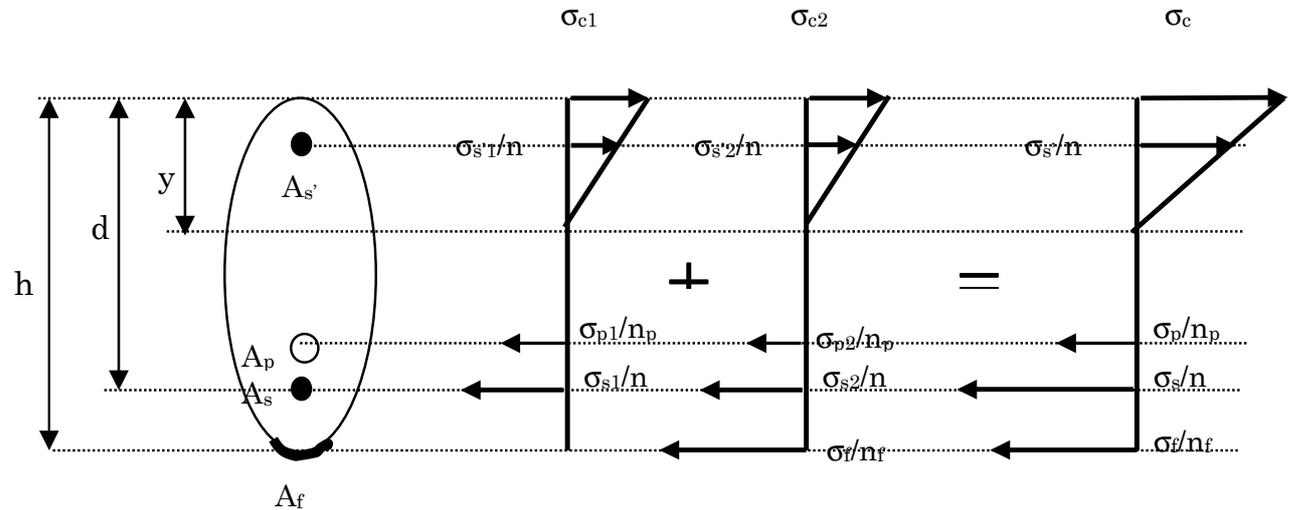


Figure 2.4.4. Diagramme des déformations et des contraintes à l'ELS avec superposition des états

avec :  $n = \frac{E_s}{E_c} \approx 15$      $n_p = \frac{E_p}{E_c}$  et     $n_f = \frac{E_f}{E_s} \cdot n$     (2.4.18)

*Commentaires : Le CCTP peut proposer une autre valeur pour le coefficient d'équivalence  $n_f$ . Dans ce cas, la valeur de  $n_f$  doit être justifiée, par exemple en fonction de l'âge de la structure et de la proportion de charges instantanées supportée par le composite. En effet, le coefficient ci-dessus est obtenu à partir de  $n=15$ , qui correspond à un rapport usuel entre les charges permanentes et d'exploitation. Dans le cas des matériaux composites mis en œuvre sur une structure existante, la proportion de charges permanentes reprise par le matériau est en général plus faible.*

**Exemple : Cas de la flexion simple : section rectangulaire en béton armé renforcée : calcul des caractéristiques mécaniques et des contraintes après renforcement.**

La position de l'axe neutre Y est calculée par :

$$Y = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 2b \cdot B}}{b}$$

$$A = n \cdot A_s' + n \cdot A_s + n_f \cdot A_f \quad (2.4.19)$$

$$B = (n \cdot d' \cdot A_s' + n \cdot d \cdot A_s + n_f \cdot h \cdot A_f)$$

L'inertie de la section est donnée par :

$$I = b \frac{y^3}{3} + n \cdot A_s' \cdot (y - d')^2 + n \cdot A_s \cdot (d - y)^2 + n_f \cdot A_f \cdot (h - y)^2 \quad (2.4.20)$$

Les contraintes sont alors calculées par :

$$\sigma_c = \frac{M_1 + M_2}{I} \cdot Y$$

$$\sigma_s = n \frac{M_1 + M_2}{I} \cdot (d - Y) \quad (2.4.21)$$

$$\sigma_f = n_f \frac{M_2}{I} \cdot (h - Y)$$

Avec  $M_1$  : moment de service avant renforcement et  $M_2$  : moment de service supplémentaire à reprendre par le composite

Les contraintes  $\sigma_{slim}$  et  $\sigma_{clim}$  sont définies au paragraphe 2.4.3. Cette condition fixe le niveau de contrainte dans le composite après avoir déterminé les déformations du composite à partir du diagramme de compatibilité des déformations.

## 2.4.4 Calcul des déformations et fissuration

### 2.4.4.1 Etat limite de déformation

Les justifications relatives à l'état limite ultime de déformation sont à présenter dans les cas spécifiés par l'article A.4.6,2 du BAEL.

Le calcul des déformations globales s'effectue sous les sollicitations issues des combinaisons de l'état limite de service. Il doit tenir compte des phases successives de construction et/ou de renforcement de la structure. Les déformations dues à la flexion sont obtenues par intégration des courbures (dues aux moments) et éventuellement des distorsions (dues aux efforts tranchants) le long des pièces. Ce calcul peut tenir compte, si nécessaire, des déformations différées (retrait et fluage) ainsi que des déformations dues à la température.

### 2.4.4.2 Prise en compte de la fissuration

La présence de renforts composites a tendance à modifier la fissuration : limitation de l'ouverture, meilleure répartition.

Dans l'état actuel des connaissances, le calcul de l'ouverture de fissure peut être effectué selon l'Eurocode 2 en négligeant la contribution du renfort composite.

#### **2.4.5 Condition complémentaire (notamment dans le cas de l'incendie)**

Pour assurer la stabilité au feu de la structure réparée, lorsque la zone réparée ou renforcée est exposée à un risque d'incendie, quelle que soit la technique de réparation retenue et quels que soient les matériaux composites utilisés, une justification à l'ELU accidentel doit être effectuée sans prendre en compte les matériaux composites exposés au feu (se reporter à l'EC2-1-2).

Cette condition s'applique pour les poutres et dalles soumises à de la flexion simple ou composée, et concerne les calculs au Feu (Règles FB).

Pour les ouvrages d'art, le CCTP précise les zones concernées par un éventuel incendie.

#### **2.4.6 Dispositions constructives**

Les fiches relatives à chaque produit précisent le nombre de couches minimum et maximum à mettre en œuvre. Par ailleurs il est recommandé de vérifier l'ensemble des dispositions constructives visant à éviter les phénomènes de poussé au vide.

#### **2.4.7 Vérification du cisaillement de glissement en flexion**

On vérifiera que le cisaillement à l'interface entre le béton et la colle est acceptable. Il peut être calculé par

$$v_{Ed} = \left( \frac{V_{Ed}}{w_f \cdot z} \right) \cdot \left( \frac{F_f}{F_f + F_s} \right) \quad (2.4.22)$$

avec  $z \approx 0,9d$  à défaut d'une valeur exacte

Dans cette expression,  $F_f$  et  $F_s$  sont respectivement les efforts à l'état limite ultime repris dans le composite et dans les aciers passifs longitudinaux.

$$\text{On vérifiera : } v_{Ed} \leq v_{add} \text{ (E.L.U.)} \quad (2.4.23)$$

*Commentaire : Le mode de ruine le plus courant des éléments fléchis est un délaminage survenant aux points qui concentrent un effort tranchant et un moment sollicitant importants. Cette condition est prépondérante dans le cas des structures faiblement armées ou fortement renforcées.*

#### **2.4.8 Vérification du délaminage à l'extrémité du renforcement – rupture interface béton-composite**

##### *2.4.8.1. Rupture de l'interface dans le béton*

**Vérification à l'état limite de service.**

On calcule l'effort repris dans le composite à l'état limite de service dans la section située juste après la zone de transfert ( $\Sigma_1$  sur la figure 2.5.1). Soit  $F_{f,ELS}$  la valeur de cet effort.

On vérifie que le cisaillement maximal dans le béton d'enrobage est inférieur au cisaillement admissible à l'ELS, en considérant une répartition moyenne de la contrainte de cisaillement.

$$v_c = \frac{F_{f,ELS}}{w_f \cdot I_{anc,d}} \leq v_{add} \quad (\text{E.L.S.}) \quad (2.4.24)$$

### Vérification à l'état limite ultime

On détermine l'épaisseur minimal de renforcement nécessaire pour assurer la résistance en flexion à l'Etat Limite Ultime de la section  $\Sigma_1$ .

Soit  $t_{f,ELU}$  cette épaisseur.

Soit  $F_{f,ELU}$  l'effort ultime correspondant dans le renforcement :

$F_{f,ELU} = E_f \times \varepsilon_{fud} \times w_f \times t_{f,ELU}$  si le pivot est D.

On vérifiera que le cisaillement maximal correspondant à l'introduction de l'effort  $F_{f,ELU}$  sur la longueur de transfert est inférieur au cisaillement admissible à l'ELU, en considérant une répartition moyenne de la contrainte de cisaillement.

$$v_{cu} = \frac{F_{f,ELU}}{w_f \cdot I_{anc,d}} \leq v_{adud} \quad (\text{E.L.U.}) \quad (2.4.25)$$

#### 2.4.8.2. Rupture de l'interface dans la colle

L'interface peut se fissurer dans la direction parallèle au plan de collage sous l'effet du couplage des contraintes normales et de cisaillement. Au moment du décollement de la plaque, en échelle macroscopique, la rupture s'exprime à partir d'une loi simplifiée de type Mohr-Coulomb (cf. Ref. bibliographique H. Varasthepour-annexe 4)

$$\tau_{ad} + \sigma_{ad} \cdot \text{tg } \phi = C \quad (2.4.26)$$

où  $\tau_{ad}$  est la contrainte de cisaillement à l'interface calculée,  $\sigma_{ad}$  la contrainte normale, C la cohésion et  $\phi$  l'angle de frottement interne.

Les valeurs de C et  $\phi$  dépendent largement du traitement de surface et des propriétés mécaniques de la colle. Elles sont déterminées à partir d'essais de flexion (cf. chapitre I, paragraphe 1.11).

Pour un cas simple, c'est-à-dire, lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface ( $\tau_{ah,d}$ ) est constante, on peut remplacer les systèmes de forces internes (figure 2.5.3) par une force tangentielle générant une contrainte tangentielle ( $\tau_{int}$ ) et un moment interne  $M_{xy}$  qui se développent sur toute la longueur du plan de colle :

$$M_{xy} = w_f \cdot (t_{ad} + t_f/2) \cdot \tau_{ad} \quad (2.4.27)$$

La contrainte normale à l'extrémité de la plaque peut être causée par ce moment interne ( $M_{xy}$ ).

$$\sigma_{ad} = K \cdot \tau_{ad} \quad (2.4.28)$$

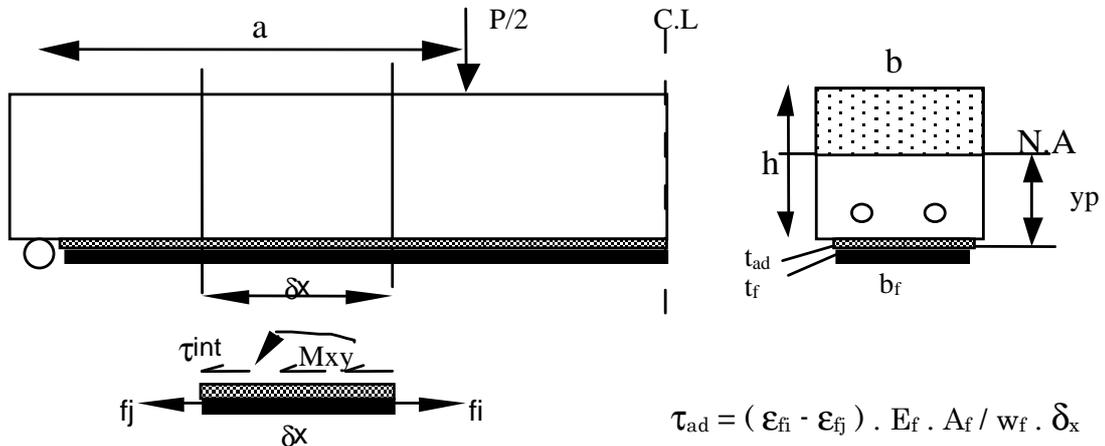


Figure 2.4.5. Distribution de la contrainte à l'interface

Dans cette équation, K est un paramètre qui montre la relation entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale à l'extrémité de la plaque composite, il ne dépend que des propriétés physiques et mécaniques de la colle et de la plaque.

$$K = 1,31 \left( \frac{t_f \cdot E_{ad}}{t_{ad} \cdot E_f} \right)^{0,25} \quad (2.4.29)$$

Critère à vérifier en fonction des conditions d'environnement :

$$\tau_{ad} = \frac{C}{1 + K \cdot \text{tg} \phi} < v_{add} \quad (2.4.30)$$

avec  $v_{add}$  définie au paragraphe 2.2.4.

## 2.5 Expressions complémentaires pour l'évaluation des charges ultimes

Les modèles présentés dans ce paragraphe sont issus d'un état des lieux qui permet d'estimer les charges ultimes de poutres ou de dalles renforcés par composites.

### 2.5.1 Détermination de la longueur de transfert du composite à l'extrémité d'un renforcement longitudinal en flexion et traction

#### Référence normative

Les références bibliographiques ci-dessous ont permis d'établir les modèles présentés dans ce paragraphe.

- B. Täljsten, Strenghtening of existing concrete structures with carbon fibre or laminates. Swedish National Railboard and roads codes, 1998.
- J.F. Destrebecq, M. Grédiac, V. Sierra-Ruiz, La liaison béton-renfort composite. Modèle pour l'analyse et le dimensionnement. Rapport AFGC 1999.
- S. Zhang, M. Raof, L.A. Wood, Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with external bonded steel plates, Journal of structures and buildings, Vol. 110, N. 3, pp.257-268, UK, 1995.
- H. Varastehpour, Optimisation du renforcement des ouvrages en béton armé par des matériaux composites, Université Claude Bernard Lyon 1, 1996.

Dans le cas du renforcement longitudinal en flexion et en traction, sans prendre en compte l'effet induit par l'effort tranchant, l'effort de traction supporté par le renfort composite à l'approche de son extrémité est transféré au béton sous la forme d'une contrainte de cisaillement répartie le long d'une zone d'ancrage.

En l'absence d'effort tranchant sollicitant l'élément renforcé, la répartition de la contrainte de cisaillement peut être considérée comme triangulaire à l'extrémité du joint (figure 2.5.1.).

Dans le cas contraire (cas général des éléments fléchis), l'existence d'un effort tranchant induit une contrainte d'entraînement qui s'ajoute à cette répartition triangulaire.

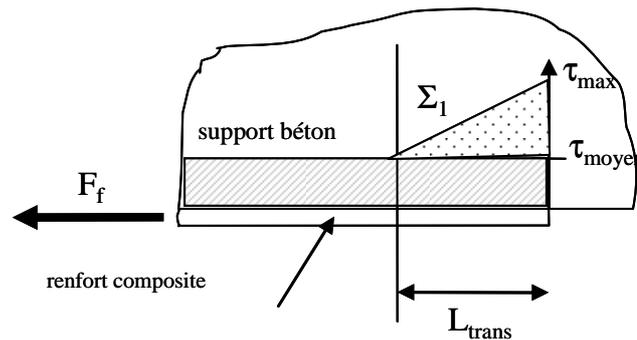


Figure 2.5.1. Répartition triangulaire de la contrainte de cisaillement

En l'absence d'effort tranchant, la valeur notée  $F_f$  de l'effort équilibré par la zone d'ancrage et par unité de largeur de renfort composite est déduite de l'expression suivante :

$$F_f = E_f \cdot t_f \cdot \Delta \epsilon \text{ avec } \Delta \epsilon = \epsilon_{\text{fud}} - \epsilon_{s0} \text{ à l'ELU} \quad (2.5.1)$$

dans le cas d'une vérification à l'ELS,  $\Delta \epsilon = \epsilon_s - \epsilon_{s0}$  ( $\epsilon_a$  est définie par les conditions de fissuration).

La longueur de transfert est donnée par l'expression suivante :

$$l_{\text{trans}} = 2 \sqrt{\frac{\alpha_f \cdot E_f \cdot t_f \cdot t_{\text{ad}}}{(\alpha_{\text{ad}} \cdot G_{\text{ad}})}} > l_{\text{anc,d}} \quad (2.5.2)$$

En l'absence de données spécifiques propres à la technologie de réparation sélectionnée (cf. chapitre III et IV), on considère les épaisseurs suivantes :

$t_{ad} \approx 0,3$  mm pour moulage au contact  
 $t_{ad} \approx 1$  mm pour collage plat pultrudé  
 $\alpha_{ad} = 0,8$  si  $T_g > 50^\circ\text{C}$   
 $\alpha_{ad} = 0,4$  si  $T_g < 50^\circ\text{C}$   
 et  $\alpha_f$  défini au paragraphe 2.2.2.

### **2.5.2 Prise en compte de l'effort tranchant pour le calcul de la longueur d'ancrage**

En cas d'existence d'un effort tranchant, l'effet d'entraînement peut être pris en compte en considérant une valeur majorée de l'effort d'ancrage notée  $F_f'$

$$F_f' = (1 + \delta)^2 F_f \quad (2.5.3)$$

et d'une valeur majorée de la longueur de transfert  $l_{trans}'$

$$l_{trans}' = (1 + \delta) l_{trans} > l_{anc,d} \quad (2.5.4)$$

Le coefficient majorant  $\delta$  est pris égal à :

$$\delta = \frac{l_{trans} \Delta V}{2 \Delta M} \quad (2.5.5)$$

$\Delta V$  et  $\Delta M$  sont évalués dans la section de la poutre au droit de l'extrémité du renfort composite.

### **2.5.3 Rupture dans la couche de béton d'enrobage en zone tendue**

Dans ce cas de mode de rupture, la charge ultime dépend de la résistance ultime du béton en traction et de la distance moyenne ( $l_p$ ) entre les fissures de flexion – et celles inclinées dans la zone d'effort tranchant (S. Zhang, M. Raouf).

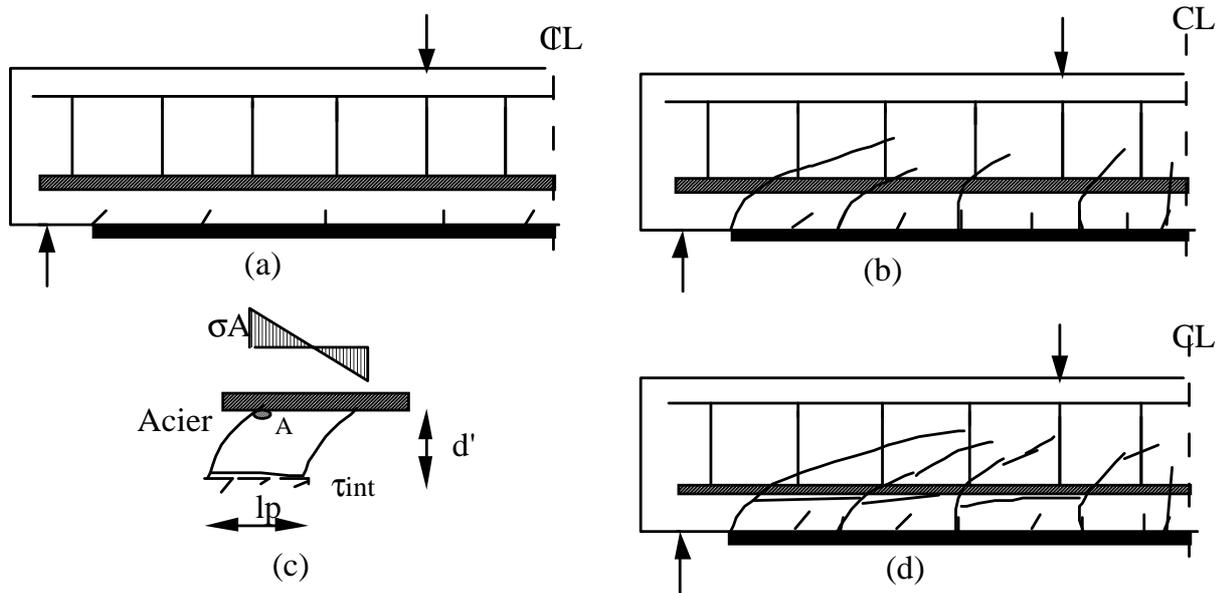


Figure 2.5.2. Différentes étapes de la propagation de fissures et un élément de la poutre

### Mécanisme de rupture

L'évolution de la fissuration dans la zone tendue pendant le chargement peut être déduite comme suit :

- les fissures de flexion se forment dans la couche de béton située entre la plaque et les aciers longitudinaux ;
- les nouvelles fissures apparaissent entre les anciennes fissures et se propagent alors au dessous de l'axe neutre ensuivant l'augmentation du chargement.

A ce moment, une partie du béton située entre deux fissures consécutives travaille comme une poutre cantilever et la section de béton au contact des aciers travaille en flexion (figure 2.6.3b). Lorsque la contrainte de traction dans cette section au point E atteint la valeur limite de la résistance du béton en traction, des fissures se propagent juste au dessous des aciers (figure 2.6.3d) et le décollement de la plaque survient de façon soudaine.

Le mécanisme de ruine proposé correspond donc à une rupture par flexion d'axe horizontal du béton situé entre deux fissures, en considérant que la section critique est située au niveau des armatures, et en négligeant les effets d'engrainement au niveau des fissures de flexion longitudinale.

### Critère de rupture

Le critère développé ci-dessous nécessite de connaître l'espacement entre deux fissures,  $l_p$ . En prenant en considération le comportement mécanique d'une partie du béton entre deux fissures, on peut le modéliser comme une poutre cantilever qui se déforme sous l'action du moment fléchissant dû à la contrainte de cisaillement dans l'interface ( $\tau_{ad}$ ). Si l'on néglige les interactions entre les différentes poutres cantilevers, et si l'on suppose un comportement élastique pour chacun d'eux, la contrainte de traction au point E (point critique) peut être calculée par :

$$\sigma_E = \frac{M_E \cdot \left(\frac{l_p}{2}\right)}{I_E} \quad (2.5.6)$$

où :  $I_E$  est le moment d'inertie de la section, égal à  $I_E = b \cdot l_p^3 / 12$

et :  $M_E = \tau_{ad} \cdot l_p \cdot w_f \cdot d'$

où  $w_f$  est la largeur de la plaque composite,  $b$  la largeur de la poutre,  $\tau_{ad}$  la contrainte de cisaillement à l'interface plaque/béton,  $l_p$  la hauteur de la section de poutre cantilever (distance entre deux fissures consécutives) qui sera pris égale à  $S_t$  : distance entre deux étriers. Finalement,  $d'$  est l'épaisseur de la couche de béton située entre la plaque et les aciers (soit la longueur du cantilever) (cf. figure 2.6.3)

En remplaçant  $M_E$  par sa valeur dans l'expression de  $\sigma_E$ , on obtient :

$$\sigma_E = \frac{6\tau_{ad} d' w_f}{s_t x b} \quad (2.5.7)$$

Au moment de la rupture, la contrainte de traction au point E atteint sa valeur maximale, c'est-à-dire  $\sigma_E$  (résistance ultime du béton en traction). La contrainte admissible à l'interface devient alors :

$$\tau_{ad} = \frac{f_{ctm} s_t b}{6d' w_f} < v_{add} \quad (\text{E.L.U.}) \quad (2.5.8)$$

## 2.6 Justification vis-à-vis des sollicitations tangentes

### 2.6.1 Généralités

Une section renforcée ou réparée avec un composite fonctionne de façon similaire à une section de béton classique. Le composite se comporte en armature passive externe.

Le dimensionnement du renforcement suit les méthodes de l'Eurocode 2 concernant les armatures passives en acier, en les adaptant aux caractéristiques des matériaux composites.

Les poutres soumises à un effort tranchant sont justifiées vis-à-vis de l'état limite ultime et de l'état limite de service.

### 2.6.2 Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques des matériaux sont définies au chapitre 2.2.

**Longueur d'ancrage par collage uniquement  $l_{anc,d}$  :**

Une longueur d'ancrage  $l_{anc,exp}$  est déterminée à partir des données expérimentales (paragraphe 1.11).

$$l_{anc,exp} = 200 \text{ mm} \cdot \frac{R_f}{F_{ade}} \quad (2.6.1)$$

avec  $F_{ade}$  l'effort de traction correspondant à  $\tau_{ad,e}$

On détermine une longueur critique d'ancrage théorique  $l_{anc,th}$  en cherchant à équilibrer l'effort de traction repris par le composite  $F_f$  par l'intégration des contraintes moyennes de cisaillement de la colle ou de l'interface sur une surface définie par le produit  $l_{anc,th} * w_f$  (largeur bande composite).

$$F_f = f_{fud} \cdot A_f = v_{add} \cdot l_{anc,th} \cdot w_f \quad (2.6.2)$$

$$\text{Avec : } l_{anc,th} = \frac{f_{fud} \cdot A_f}{v_{add} \cdot w_f} \quad (2.6.3)$$

Et avec  $v_{add}$  le cisaillement de dimensionnement défini paragraphe 2.2.4.

La longueur d'ancrage par collage uniquement de dimensionnement est définie par :

$$l_{anc,d} = \min \{ 200; l_{anc,exp}; l_{anc,th} \} \quad (2.6.4)$$

### 2.6.3 Etat limite ultime de résistance

Dans le cadre d'une réparation ou d'un renforcement, les matériaux composites viennent en complément des aciers passifs. Le composite se comporte comme une armature externe complémentaire des aciers passifs existants.

A l'ELU, après fissuration et création d'un treillis, la résistance à l'effort tranchant de la section réparée ou renforcée,  $V_{Rd}$ , est alors le minimum des efforts que peuvent reprendre :

- d'une part la section en béton armé ou précontraint au travers des bielles de compression du béton,  $V_{Rd,max}$ ,
- d'autre part les aciers passifs présents  $V_{Rd,s}$  et les bandes de matériaux composites  $V_{Rd,f}$

$$V_{Rd} = \min (V_{Rd,max}; V_{Rd,s} + V_{Rd,f}) \quad (2.6.5)$$

Commentaire 1 : Cette vérification correspondant donc au calcul de l'Eurocode 2 "d'éléments pour lesquels des armatures d'effort tranchant sont requises".

Commentaire 2 : Si la poutre en béton a été renforcée à la flexion (précontrainte additionnelle, bandes ou plats de matériaux composites longitudinaux, etc), il convient de tenir compte de la variation de l'effort tranchant ou de l'augmentation de résistance à l'effort tranchant de la section apportée par le renforcement à la flexion (§ EC2 6.2).

#### Remarque préalable

Les hypothèses ci-après supposent que les aciers passifs sont totalement pris en compte, ce qui est généralement le cas pour les renforcements, mais pas nécessairement pour les réparations.

#### Dimensionnement des matériaux composites :

Il s'agit de déterminer la répartition des bandes de composite sur les faces latérales : leur largeur  $w_f$  et leur espacement  $s_f$ .

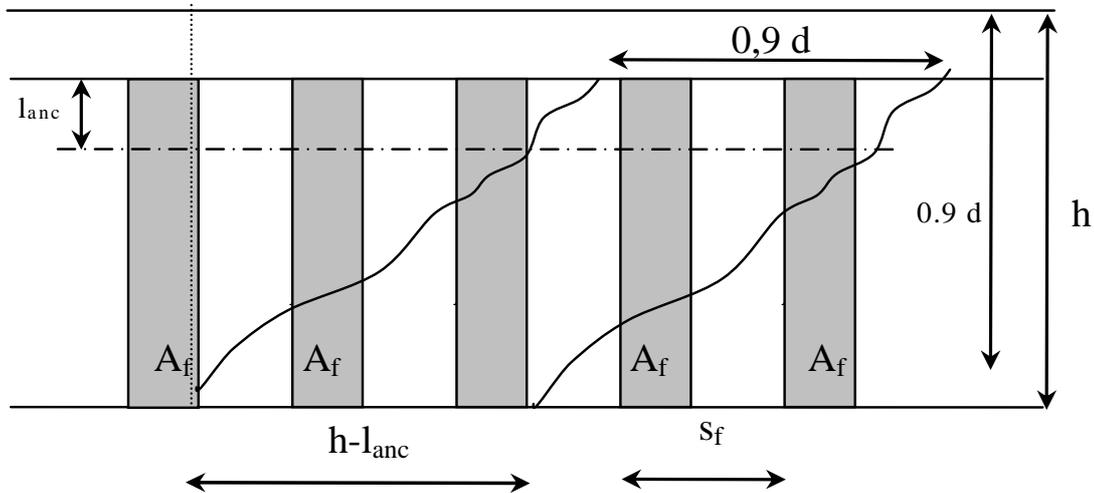


Figure 2.6.1. Renforcement à l'effort tranchant dans une poutre en T

Le principe du calcul est de se référer au treillis de Ritter-Morsch mais sur une section réduite de la poutre. La section de béton comprimé est réduite, pour que la résultante de l'effort de compression soit à une côte définie comme celle de l'extrémité du renfort en composite moins la longueur d'ancrage. On calcule la résistance apportée par le composite sur la section ainsi réduite.

Trois cas se présentent :

A - si la poutre le permet, les bandes de composite entourent la poutre. Il n'y a pas de problèmes d'ancrage :  $l_{anc} = 0$  cm ;

B - si la poutre se trouve sous une dalle, le composite est collé sur les deux faces latérales en continuité en passant sous la poutre. Il reste une contrainte d'ancrage aux extrémités supérieures des bandes proches de la dalle. Le composite intervient comme armature pour «recoudre» une fissure potentielle d'effort tranchant ;

C - si la poutre se trouve sous une dalle, le composite peut être collé sur les deux faces latérales sans continuité sous la poutre, dans ce cas la hauteur de l'âme de la poutre doit être sensiblement supérieure à deux fois la longueur d'ancrage d'effort tranchant ;

$$l_{anc, Vu} = \text{longueur d'ancrage d'effort tranchant}$$

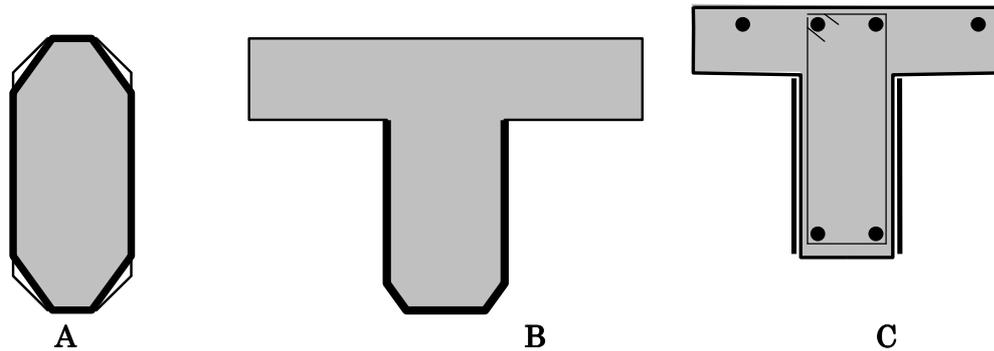


Figure 2.6.2. Armatures complémentaires en composite vis-à-vis de l'effort tranchant

La partie supérieure du composite, correspondant à la longueur d'ancrage  $l_{anc,Vu}$  choisie lors du dimensionnement n'est pas prise en compte dans le renfort. La résistance à l'effort tranchant du composite est alors :

$$V_{Rd,f} = \alpha_v \frac{A_f f_{fud} \cdot \text{Min} [0,9d, (h_f - l_{anc,Vu})]}{s_f} \cdot \frac{\sin(\beta + \theta)}{\sin \theta} \quad (2.6.6)$$

$\alpha_v$  : coefficient minorant la contrainte de traction. S'il n'est pas possible d'ancrer le composite sur la longueur d'ancrage de calcul,  $l_{anc,d}$ , la contrainte de traction dans le composite ne peut pas être égale à  $f_{fud}$ . Du choix de la valeur de  $l_{anc,Vu} \leq l_{anc,d}$ , va dépendre la valeur du coefficient  $\alpha_v$  minorant la contrainte de traction dans le

composite transversal à  $\alpha_v \cdot f_{fud}$  avec  $\alpha_v = \frac{l_{anc,Vu}}{l_{anc,d}} \quad 0 \leq \alpha_v \leq 1$  (2.6.7)

$A_f = 2 \cdot t_f \cdot w_f$   $w_f$  étant la largeur d'une bande verticale de composite et  $t_f$  son épaisseur,

$h_f$  est la longueur d'une bande verticale de composite,

$\theta$  : angle d'inclinaison des bielles (par rapport à la fibre moyenne). Cet angle peut varier entre  $21,8^\circ$  et  $45^\circ$  en compression et flexion simple et entre  $\sqrt{1 + \sigma_{ct} / f_{ctm}}$  et

$2,5\sqrt{1 + \sigma_{ct} / f_{ctm}}$  en traction selon l'Eurocode 2 ( $\sigma_{ct}$  est la contrainte de traction au centre de gravité). L'Eurocode 2 permet donc une inclinaison des bielles plus importante, néanmoins il convient de veiller à ne pas trop incliner ces bielles dans le cas des éléments en béton armé pour ne pas créer de problème de fissuration excessive aux ELS ( $34^\circ$  selon EC2-1-1/AN 7.3.1 (10), EC2-2/AN 6.8.1 (102)). De plus, le choix de ce paramètre dépend de l'écrasement des bielles de béton et des efforts induits dans les armatures longitudinales par l'effort tranchant.

Dans le cas où des fissures existent déjà sur l'élément à renforcer, il convient de respecter l'angle des fissures observé.

Dans le cas où les fissures ne sont pas encore apparues, leur position n'est pas connue *a priori*. Pour qu'aucune fissure potentielle n'apparaisse entre les bandes de renforcement composite, la condition sur l'espacement des bandes est :  $s_f < (h_f - l_{anc})$ .

$\beta$  : angle d'inclinaison du composite (par rapport à la fibre moyenne). Pour optimiser le travail des bandes de matériaux composites, il est possible de mettre les bandes de composites perpendiculaires aux fissures.

$f_{fu,d}$  est la contrainte ultime mobilisable dans le composite, compte tenu du respect de la compatibilité des déformations entre les aciers passifs et éventuellement de précontrainte d'effort tranchant et les bandes de composite.

Dans le cas C, la plupart des recommandations internationales limite la déformation maximale dans le renfort composite pour définir la valeur maximale admissible de l'effort repris par le composite.

D'où selon les recommandations de ISIS Canada dans le cas C lorsque  $h-2l_{anc} \geq 0$  :

$$\epsilon_{fu,d} = \min \left\{ \frac{f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot d_{FRP} - L_e f_{f,d}}{110000 \cdot d_{FRP}} ; 0,2\% \right\} \quad (2.6.8)$$

$$\text{avec } L_e = \frac{23300}{(t_f E_f)^{0.58}} \quad \text{et} \quad d_{FRP} = \text{Min}\{0,72h ; 0,9d\} \quad (2.6.9)$$

Par exemple, les recommandations d'ISIS Canada limite dans le cas C les déformations à 0,2 % pour les poutres faiblement élancés ( $h-2l_{anc} = 0$ ) et 0,4 % dans les poutre plus élancés ( $h-2l_{anc} > 0$ ). Nous retenons 0,2 % dans tous les cas.

### Résistance de la poutre en béton :

Les expressions donnant les valeurs de  $V_{Rd,max}$  et  $V_{Rd,s}$  sont définies dans l'Eurocode 2.

La contribution des armatures d'effort tranchant peut être évaluée à l'aide de l'expression suivante :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2.6.10)$$

$A_{sw}$  : aire de la section des armatures d'effort tranchant

$s$  : espacement des armatures d'effort tranchant

$z$  : bras de levier

$f_{ywd}$  : limite d'élasticité de calcul des armatures d'effort tranchant

$\alpha$  : angle d'inclinaison des armatures d'effort tranchant

La résistance des bielles de compression doit être assurée, en déterminant l'effort tranchant maximum qui peut être repris par la section avant écrasement des bielles de compression,  $V_{Rd,max}$  (EC2 6.2.3 (3)). Le cumul avec la torsion doit être effectué. Afin

d'être sécuritaire, il doit être mené uniquement avec le treillis béton-aciers sans prendre en compte la contribution du matériau composite.

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} (\cot \theta + \cot \alpha) / (1 + \cot^2 \theta) \quad (2.6.11)$$

$\alpha_{cw}$  est un coefficient tenant compte de l'état de contrainte dans la membrure comprimée :  $\alpha_{cw} = 1 + \sigma_{ct} / f_{ctm}$ , avec  $\sigma_{ct}$  la contrainte de traction moyenne. La valeur de  $\alpha_{cw}$  est de 1 pour les structures non-précontrainte.

$b_w$  est la plus petite largeur de la section comprise entre la membrure tendue et la membrure comprimée

$z$  est le bras de levier des forces internes

$v_1$  est un coefficient de réduction de la résistance du béton fissuré à l'effort tranchant (valeur recommandée  $v_1 = v$ )

$$v = 0,6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,52 \quad (2.6.12)$$

$f_{cd}$  est la résistance de calcul en compression du béton définie par  $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$

$\alpha_{cc}$  est un coefficient tenant des effets à long terme sur la résistance en compression et des effets défavorables résultant de la manière dont la charge est appliquée (valeur recommandée  $\alpha_{cc} = 1$ )

$\gamma_c$  est le coefficient partiel relatif au béton (qui vaut 1,5 aux ELU)

### Vérification de l'effort de traction induit dans les armatures longitudinales :

Il convient également d'évaluer l'effort de traction supplémentaire induit dans les armatures longitudinales par l'effort tranchant  $\Delta F_{td,v}$  (EC2 6.2.3 (7)) :

$$\Delta F_{td,v} = 0,5 V_{Ed} (V) (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (2.6.13)$$

$V_{Ed} (V)$  : Effort tranchant sollicitant

Cet effort doit être cumulé avec les efforts de torsion conformément à l'Eurocode 2 (§6.3).

Plus l'angle d'inclinaison des fissures sera faible, plus l'effort longitudinal induit sera important. Cet aspect doit donc être pris en compte lors de la détermination de l'angle d'inclinaison des fissures.

Dans la membrure tendue, les aciers longitudinaux et la surtension dans les câbles de précontrainte peuvent être pris en compte pour équilibrer l'effort induit.

Dans la membrure comprimée, il est possible de prendre en compte la décompression du béton.

Si ces contributions ne suffisent pas, soit il faut redresser les bielles de compression du béton soit il faut envisager un renforcement longitudinal.

#### **Vérification du taux de travail du béton :**

Le taux de cisaillement du béton doit être vérifié, notamment à l'interface de la table de compression dans le cas des poutres en T. Le but étant de ne pas créer de zone fragile dans la zone d'ancrage du composite.

#### **2.6.4 Etat limite de service**

Pour toutes les structures en béton, l'article 7.3.3 (5) de Eurocode 2-1-1 précise que dans le cas où :

- les dispositions constructives à la section 9 sont respectées
- les quantités d'aciers sont suffisantes vis-à-vis de l'ELU,

on peut considérer que la fissuration due aux sollicitations tangentes est maîtrisée.

**Pour les bâtiments**, la question de la maîtrise de la fissuration est à apprécier au cas par cas en fonction des particularités de la structure.

**Pour les ponts**, l'Eurocode 2-2 et son annexe nationale apporte des compléments

#### Dans le cas des ponts en béton précontraint :

L'annexe QQ de l'Eurocode 2-2 définit à l'ELS une contrainte principale de traction à ne pas dépasser pour éviter en théorie une fissuration des âmes.

Deux cas peuvent se présenter :

- la contrainte principale de traction est inférieure à la contrainte limite donnée par l'annexe QQ : Dans ce cas il n'est pas nécessaire d'effectuer une justification de la maîtrise de la fissuration à l'ELS.
- la contrainte principale de traction est supérieure à la contrainte limite donnée par l'annexe QQ ou l'ouvrage présente une fissuration d'effort tranchant. Dans ce cas, l'Eurocode renvoie aux articles relatifs à la maîtrise de la fissuration en flexion. Toutefois, la référence à ces clauses ne donne aucune indication pratique pour effectuer le calcul complet d'ouverture de fissures d'effort tranchant. La question de la maîtrise de la fissuration est alors à apprécier au cas par cas en fonction des particularités de l'ouvrage (injection des fissures, mise en œuvre d'un revêtement de protection, etc.).

#### Dans le cas des ponts en béton armé :

La fissuration des âmes des sections en béton armé est admise par l'Eurocode 2, mais ne doit pas être excessive.

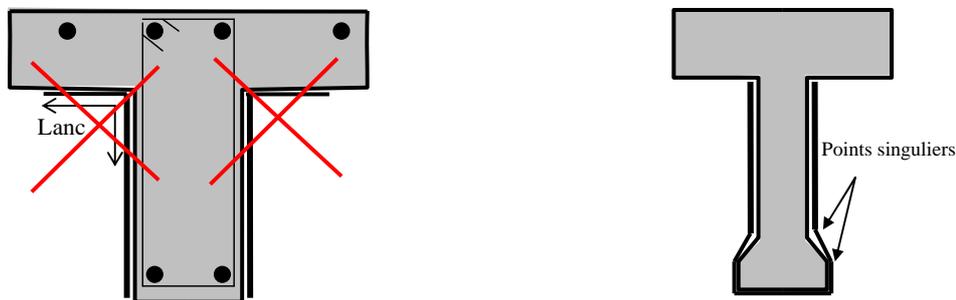
Deux approches sont possibles (cf. guide méthodologique "Eurocode 2 – Application aux ponts-routes en béton – page 120) :

- soit effectuer un calcul de vérification explicite d'ouvertures de fissure à l'effort tranchant,
- soit retenir une inclinaison raisonnable des bielles à l'ELU ( $1 < \cotan \theta < 1,5$  soit un angle d'inclinaison des bielles compris entre 34 et 45 ° selon l'article 110 de l'annexe nationale à l'Eurocode 2.)

La seconde approche est conseillée dans la mesure où aucune indication pratique n'est donnée par les Eurocodes pour la première approche. Il suffit donc de dimensionner la réparation ou le renforcement à l'ELU en limitant l'inclinaison des bielles.

### 2.6.5 Dispositions constructives

Dans le cas où l'ancrage n'est pas suffisant dans la hauteur de la poutre, il est déconseillé de s'ancrer en prolongeant le renfort sur l'intrados de la table de compression sans dispositif d'anti-poussée au vide ancré. De même sur une semelle inférieure évasée, des dispositifs d'anti-poussée au vide ancrés doivent être proposés pour traiter les points singuliers et éviter la poussée au vide et le décollement des renforts.



(a) Ancrage du renfort en sous face de dalle en partie basse

(b) Non-linéarité du renfort

Figure 2.6.3. Détails sur les dispositions constructives à éviter dans le cas du renforcement à l'effort tranchant

## 2.7 Vérification de condition de non poinçonnement de dalle en béton armé

### 2.7.1 Principe et domaine d'application

Lorsque l'on applique une charge concentrée sur une structure, il est nécessaire de vérifier que son application ne produise pas une rupture soudaine par pénétration à travers la dalle, appelée rupture par **poinçonnement** (EN-1992-1.1- 6.4). Selon le

règlement Eurocode 2, une vérification spécifique de l'élément en béton armé doit être faite sous l'action de la force de poinçonnement. Cette force concentrée peut être induite par une charge  $Q$  (pieds d'une machine, roue isolée de véhicules ...) ou encore par la réaction  $Q$  d'une colonne sur la dalle (Cf. Fig. 2.7.1). Le mode de rupture associé au poinçonnement se produit suivant un mode fragile sans déformations plastiques avant rupture. (P. MENETREY [1], S. GUANDALINI [2]).

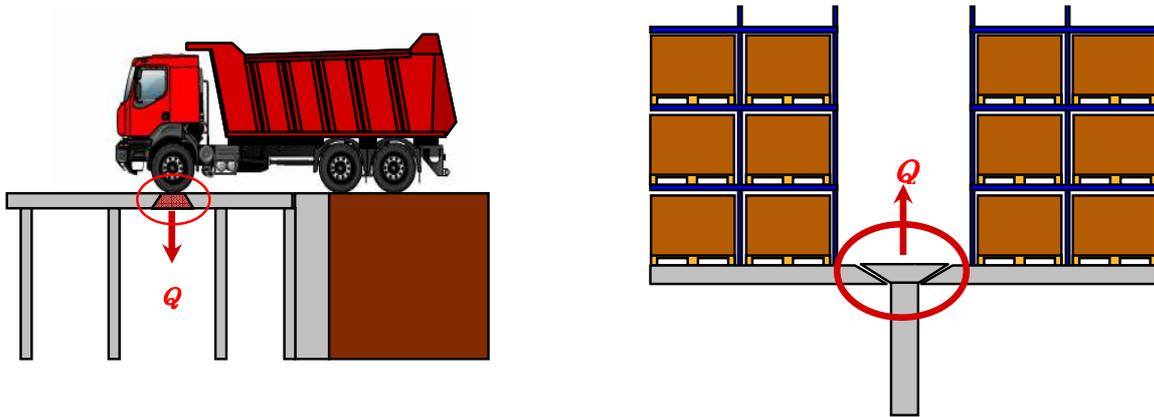


Fig. 2.7.1 : Différentes causes de poinçonnement

Le dimensionnement au poinçonnement concerne une charge concentrée appliquée sur une aire relativement petite (aire chargée) pour différents types d'éléments structuraux. La méthode de dimensionnement proposée s'applique aux dalles à l'exception du cas des planchers champignon. L'interaction avec les règles de dimensionnement en flexion et la prise en considération d'efforts normaux (cas de la précontrainte) ne sont pas examinées.

Les taux de ferrailage passifs de flexion doivent être compris entre 0,1 % et 0,7 %. Pour des taux d'armature supérieurs à 0,7 %, la validité des formules proposées devra faire l'objet de vérifications complémentaires.

### 2.7.2 Modèle pour la vérification au poinçonnement à l'ELU

Tout élément de structure soumis à une charge ponctuelle doit faire l'objet d'une vérification de non-poinçonnement liée à la géométrie de la dalle et à la localisation de l'effort. En l'absence d'armatures spécifiques au poinçonnement, la résistance fait intervenir les contributions du béton et de l'acier tendu ( $F_{ct}$  et  $F_{dows}$ ) représentées sur la figure 2. Dans le cas du renforcement par collage externe de matériaux composites, il sera possible de prendre en considération un effort complémentaire  $F_{dowf}$  (E.H. ROCHDI [3], L. MICHEL [4]).

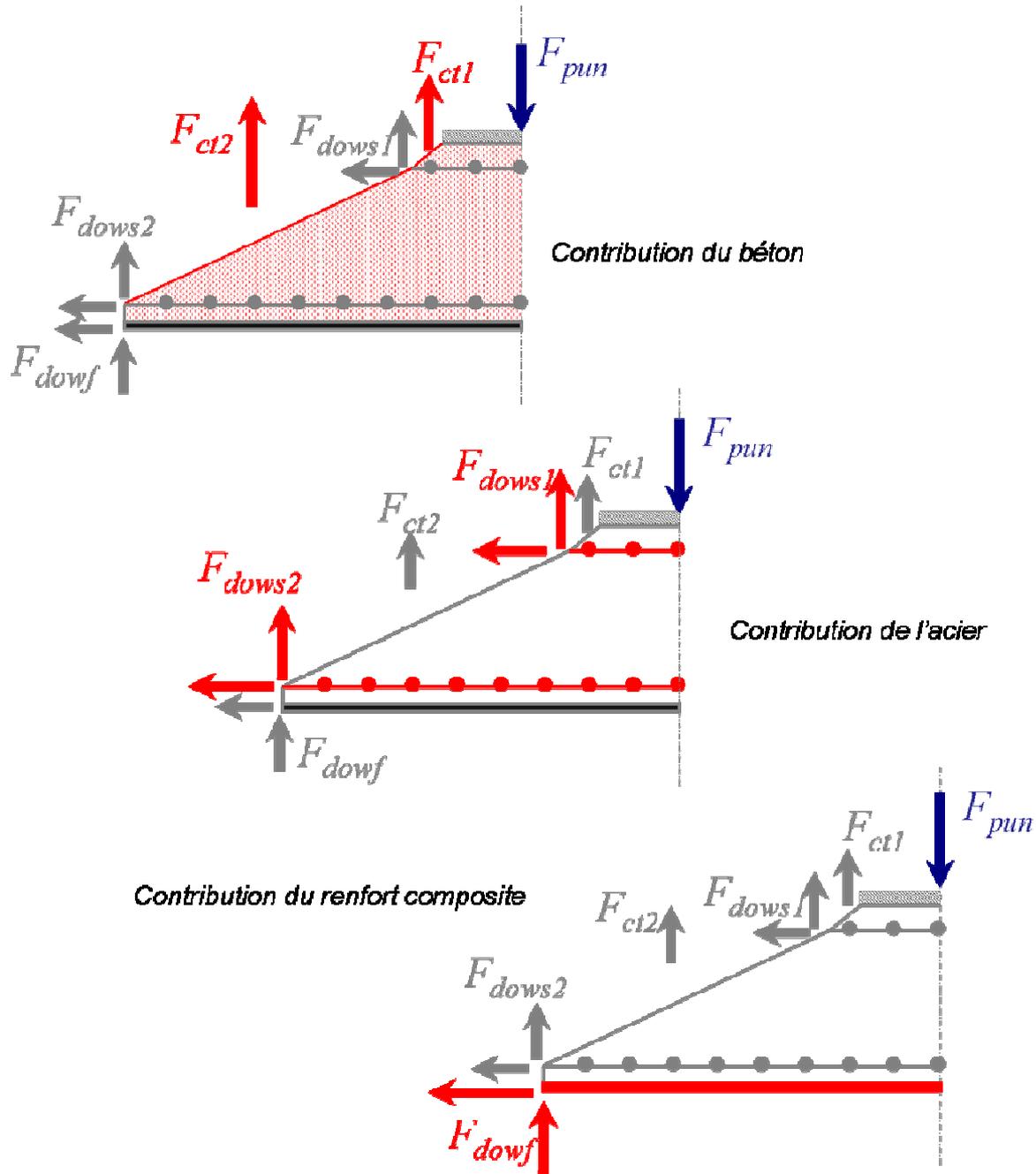


Figure. 2.7.2 : Equilibre d'une section béton armé poinçonnée (sous charge localisée)

### 2.7.3 Règles de dimensionnement

La vérification du poinçonnement selon l'Eurocode 2 s'établit en deux parties [EN-1992-1.1- 6.4.3] :

- ✓ une première vérification de la résistance au poinçonnement de la dalle dans le contour de contrôle de référence en l'absence d'armatures verticales de poinçonnement [EN-1992-1.1- 6.4.4]. Il est à noter que cette première vérification

prend en compte les armatures horizontales de flexion par l'intermédiaire d'un coefficient  $\rho$ . Seules les armatures tendues sont considérées.

✓ Si cette vérification n'est pas satisfaite, il convient de prendre en compte, les éventuelles armatures verticales de poinçonnement situées à proximité du poteau ou de la charge appliquée [EN-1992-1.1- 6.4.5].

La méthode de calcul est fondée sur des vérifications effectuées pour une série de sections de contrôle, de forme semblable à celle de la section de contrôle de référence  $u_1$ . On définit les valeurs de calcul des contraintes résistantes au poinçonnement le long des sections de contrôle :

$V_{Rd,c}$	contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle <b>sans</b> armatures de poinçonnement le long de la section de contrôle considérée
$V_{Rd,cs}$	contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle <b>avec</b> armatures de poinçonnement le long de la section de contrôle considérée
$V_{Rd,max}$	contrainte maximale de calcul de la résistance au poinçonnement le long de la section de contrôle considérée

Il convient donc de procéder aux vérifications suivantes :

Le long du contour de la colonne ou du contour de l'aire chargée, la contrainte limite de poinçonnement doit satisfaire :

$$V_{Ed} < V_{Rd,max}$$

Aucune armature de poinçonnement n'est nécessaire si :

$$V_{Ed} < V_{Rd,c}$$

Il faut prévoir des armatures de poinçonnement dans la section de contrôle lorsque :

$$V_{Ed} > V_{Rd,c}$$

avec:  $V_{Ed}$  : contrainte de calcul de la contrainte de cisaillement [MPa].

Dans le cas de renforts composites, le contour de référence  $u_1$  est situé à une distance  $2d$  de l'aire chargée en convenant de minimiser la longueur du tracé. La longueur utile  $2d$  de la dalle est considérée comme constante et est calculée de la manière suivante :

$$2d = \frac{d_{eff}}{\tan \theta} \quad (2.7.1)$$

où  $d_{eff}$  est la hauteur utile de la dalle et  $\theta$  est l'angle d'inclinaison de la fissure de poinçonnement, valeur proposée égale à  $26,6^\circ$  par l'Eurocode pouvant être modifiée en fonction du taux d'armatures horizontales, des propriétés géométriques et des matériaux ( $26,6^\circ$  étant la valeur minimale).

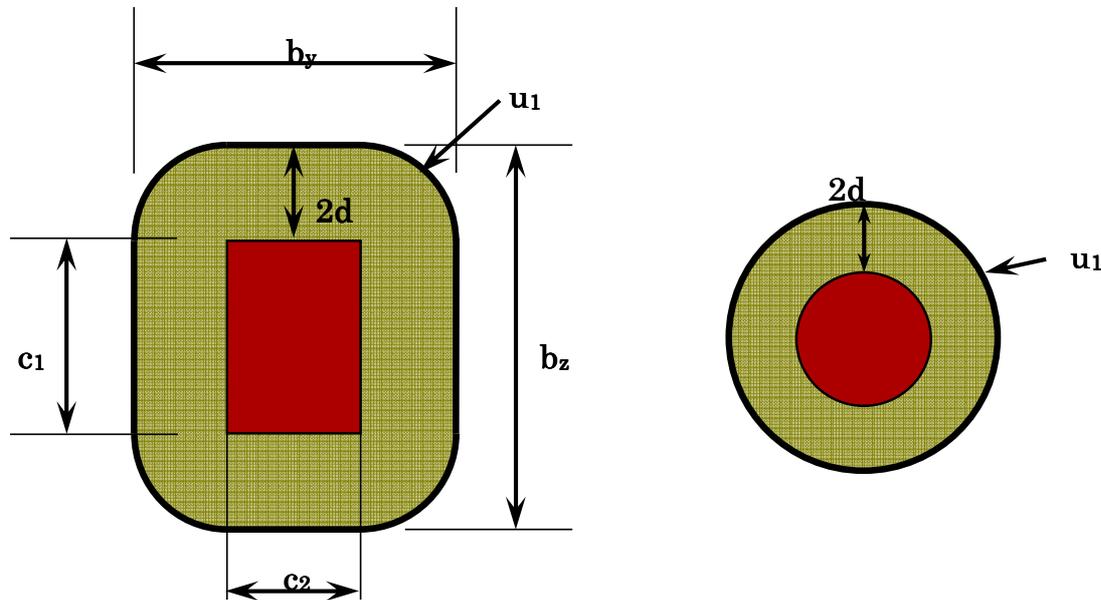


Figure 2.7.3 : Contours de contrôle de référence types autour d'aires chargées

A titre d'exemple, dans le cas d'un chargement rectangulaire, le contour de contrôle de référence  $u_1$  se calcule selon l'Eurocode 2 à l'aide de la formule suivante :

$$u_1 = 2 \cdot c_1 + 2 \cdot c_2 + 2 \cdot \pi \cdot 2d$$

(dans le cas d'un chargement rectangulaire)

#### 2.7. 4 Règles de dimensionnement

##### Domaine d'application de la méthode

L'Eurocode 2 stipule qu'il est nécessaire de vérifier la résistance au poinçonnement au nu de poteau (ou de la zone chargée) et sur le contour de contrôle de référence  $u_1$ . [EN-1992-1.1- 6.4.1]

#### 2.7.5 Prise en compte du renforcement dans le calcul de la résistance ultime des dalles

##### Cas des dalles sans armatures spécifiques de poinçonnement non renforcées par matériaux composites

En l'absence de contraintes normales dans le béton dans la section critique, dans les directions y et z, la valeur de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle en béton armé, établie par l'Eurocode 2, est donnée par la relation (2.7.3) suivante :

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3}$$

[MPa]

avec:

$f_{ck}$  : contrainte caractéristique à la compression du béton [MPa],

$$k = \min \left[ 1 + \left( \frac{200}{d_{\text{eff}}} \right)^{1/2} ; 2 \right] \quad \text{avec } d \text{ en [mm]}, \quad (2.7.4)$$

La hauteur utile  $d_{\text{eff}}$  de la dalle est considérée constante et peut normalement être prise égale à :

$$d_{\text{eff}} = \frac{(d_y + d_z)}{2} \quad (2.7.5)$$

où  $d_y$  et  $d_z$  sont les hauteurs utiles des armatures dans deux directions orthogonales.

$\rho_l$  : ratio moyen d'aciers tendus

$$\rho_l = \min \left[ \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} ; 0,02 \right] \quad (2.7.6)$$

$\rho_y$  et  $\rho_z$  sont relatifs aux armatures tendues adhérentes dans les directions y et z

$$\rho_{ly} = \frac{A_{sy}}{d_y} \quad \text{ratio acier //Oy} \quad (2.7.7)$$

$$\rho_{lz} = \frac{A_{sz}}{d_z} \quad \text{ratio acier //Oz} \quad (2.7.8)$$

La valeur de  $C_{Rd,c}$ , est donnée dans l'Annexe Nationale de l'Eurocode 2. La valeur prescrite est :

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (\gamma_c = 1,5) \quad [\text{MPa}] \quad (2.7.9)$$

### Cas des dalles sans armatures spécifiques de poinçonnement renforcées par matériaux composites

La valeur de calcul de résistance au poinçonnement par unité de surface (2.7.10) d'une dalle renforcée par matériaux composites peut être considérée comme la sommation de la valeur de calcul de résistance au poinçonnement de la partie béton armé et de la valeur de calcul de la partie renforcement composite :

$$v_{Rd,cf} = \max\{v_{min}; v_{Rd,c} + v_{Rd,f}\} \quad (2.7.10)$$

avec:

$v_{Rd,cf}$ : valeur de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle sans armatures de poinçonnement renforcée par matériaux composites le long de la section de contrôle considérée [MPa],

$v_{Rd,c}$ : valeur de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle sans armatures de poinçonnement le long de la section de contrôle considérée [MPa],

$v_{Rd,f}$ : valeur de calcul de la résistance au poinçonnement de la partie renforcement composite le long de la section de contrôle considérée [MPa].

$v_{Rd,c}$  se calcule comme dans le cas des dalles non renforcées par matériaux composites.

$$v_{min} = 0,035.k^{3/2}.f_{ck}^{1/2} \quad (\text{AN EC2}) \quad (2.7.11)$$

### Configurations possibles des renforts composites

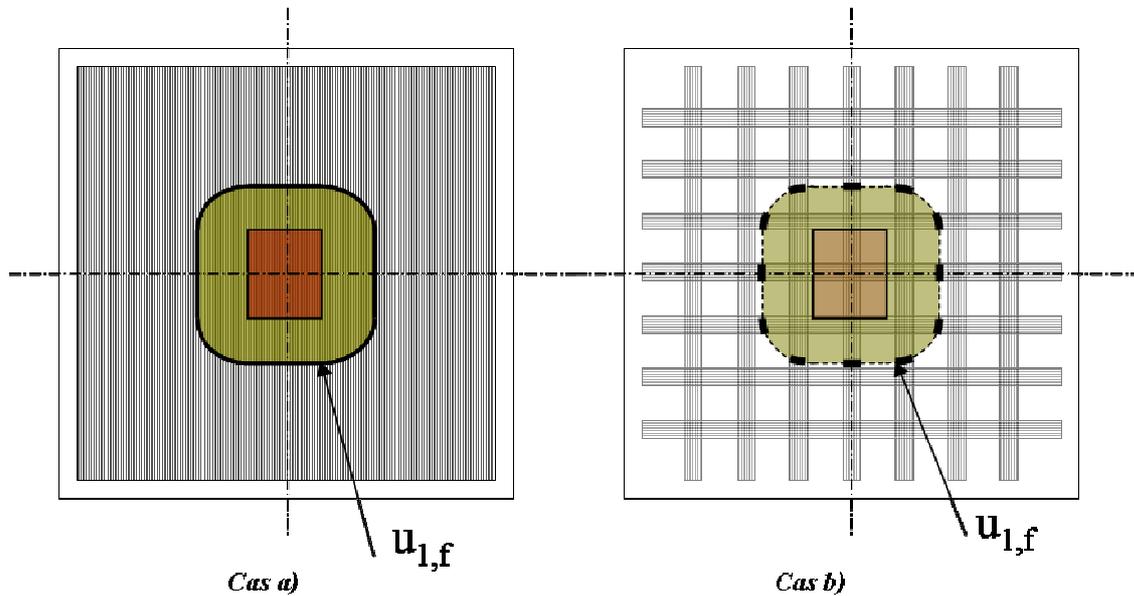


Figure 2.7.4 : Les différentes configurations de renforcement au droit d'une zone de poinçonnement

Dans le cas d'un renforcement par matériaux composites appliqué en pleine surface, le contour de contrôle de référence  $u_1$  se calcule de façon identique aux cas de dalles béton armé non renforcées (Figure 2.7.4 : cas a). La longueur de bande totale de composite sollicitée ( $u_{1,f}$ ) est égale à la valeur du contour de contrôle de référence ( $u_1$ ).

Dans le cas d'un renforcement par matériaux composites par bandes croisées, le contour de contrôle de référence  $u_1$  se calcule de façon identique aux cas de dalles béton armé non renforcées (Figure 2.7.4 : cas b). La longueur de bande totale de composite sollicitée ( $u_{1,f}$ ) est égale à la longueur de composite coupant la valeur du contour de contrôle de référence ( $u_1$ ).

### Méthode de calcul

Le renforcement par tissu composite, unidirectionnel ou bidirectionnel, n'est pas isotrope. Les résistances dépendent de l'orientation des fibres par rapport aux efforts.

### Renforcement par matériaux composites appliqué en pleine surface

Dans le cas d'un renforcement par matériaux composites appliqué en pleine surface (Figure 2.7.4 : cas a), la résistance en fonction de l'orientation des fibres doit être prise en considération. Le terme correspondant à la résistance au poinçonnement du renfort composite  $v_{Rd,f}$  se détermine de la façon suivante :

$$v_{Rd,f} = \frac{\psi}{\chi} \cdot \frac{u_{1,f} \cdot t_f \cdot n_p}{u_1 \cdot \gamma_f} \cdot \left( \frac{f_{fd,90^\circ}}{2 \cdot c_1} + \frac{f_{fd,0^\circ}}{2 \cdot c_2} + \frac{f_{fd,45^\circ}}{2 \cdot \pi \cdot 2d} \right) \quad (2.7.12)$$

avec:

$c_1$  : Longueur de la zone de contact, orthogonale aux fils de chaîne [m]

$c_2$  : Longueur de la zone de contact, orthogonale aux fils de trame [m]

$2d$  : Distance utile du renforcement de la dalle [m]

$f_{fd,90^\circ}$  : Résistance caractéristique du renfort composite dans la direction  $90^\circ$  [MPa] (cf §1.7)

$f_{fd,0^\circ}$  : Résistance caractéristique du renfort composite dans la direction  $0^\circ$  [MPa] (cf §1.7)

$f_{fd,45^\circ}$  : Résistance caractéristique du renfort composite (orientation  $45^\circ$ ) [MPa], déterminée expérimentalement ou calculée à partir du critère de Hill-Tsai.

$$f_{fd,45^\circ}^2 \cdot \left[ \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{1}{f_{fd,90^\circ}^2} + \frac{1}{\tau_{fd}^2} \right) \right] \leq 1 \quad (2.7.13)$$

avec  $\tau_{fd}$  : résistance de cisaillement caractéristique dans le plan du pli de collage [MPa] (cf §1.10).

- $n_p$  : Nombre de couches de renfort composite
- $t_f$  : Epaisseur d'une couche de renfort composite [m]
- $u_1$  : Contour de contrôle de référence [m]
- $u_{1,f}$  : Largeur totale des bandes composites coupées par le périmètre critique [m]
- $V_{Rd,f}$  : Résistance au poinçonnement liée au composite [MPa]
- $\gamma_f$  : Coefficient de sécurité ( $\gamma_f = 1,15$ )
- $\psi$  : Coefficient prenant en compte l'épaisseur totale de renfort

Dans une démarche de prédimensionnement, le terme relatif à la zone orientée à 45° peut être négligé dans le calcul. Dans ce cas :

$$V_{Rd,f} = \frac{\psi}{\chi} \cdot \frac{u_{1,f} \cdot t_f \cdot n_p}{u_1 \cdot \gamma_f} \cdot \left( \frac{f_{fd,90^\circ}}{2 \cdot c_1} + \frac{f_{fd,0^\circ}}{2 \cdot c_2} \right)$$

### Renforcement par matériaux composites par bandes croisées

Dans le cas d'un renforcement par matériaux composites par bandes croisées (Figure 2.7.4 : cas b), le terme correspondant à la résistance au poinçonnement du renforcement total par composite  $V_{Rd,f}$  se détermine en fonction des termes de résistance des renforts composites dans chaque direction, à savoir  $V_{Rd,fy}$  dans la direction  $y$  et  $V_{Rd,fz}$  dans la direction  $z$  :

$$V_{Rd,f} = V_{Rd,fy} + V_{Rd,fz} \quad (2.7.15)$$

Dans la direction  $y$  :

Dans la direction  $z$  :

$$V_{Rd,fy} = \frac{\psi}{\chi} \cdot \frac{u_{1,fy} \cdot w_{fy} \cdot t_{fy} \cdot n_{py}}{u_1^2 \cdot \gamma_f \cdot d_{eff}} \cdot f_{fd}$$

$$V_{Rd,fz} = \frac{\psi}{\chi} \cdot \frac{u_{1,fz} \cdot w_{fz} \cdot t_{fz} \cdot n_{pz}}{u_1^2 \cdot \gamma_f \cdot d_{eff}} \cdot f_{fd}$$

avec:

$d_{eff}$  : Hauteur utile de la dalle [m]

$f_{fd}$  : Résistance caractéristique du renfort composite [MPa]

$n_{py}$  : Nombre de couches de renfort composite dans la direction y [m]

$n_{pz}$  : Nombre de couches de renfort composite dans la direction z [m]

$t_{fy}$  : Epaisseur d'une couche de renfort composite dans la direction y [m]

$t_{fz}$  : Epaisseur d'une couche de renfort composite dans la direction z [m]

$w_{fy}$  : Largeur des bandes de tissu composite dans la direction y [m]

$w_{fz}$  : Largeur des bandes de tissu composite dans la direction z [m]

$u_1$  : Contour de contrôle de référence [m]

$u_{1,fy}$  : Largeur totale des bandes composites coupées par le périmètre critique (direction y) [m]

$u_{1,fz}$  : Largeur totale des bandes composites coupées par le périmètre critique (direction z) [m]

$V_{Rd,fy}$  : Résistance au poinçonnement liée au composite dans la direction y [MPa]

$V_{Rd,fz}$  : Résistance au poinçonnement liée au composite dans la direction z [MPa]

$\gamma_f$  : Coefficient de sécurité ( $\gamma_f = 1,15$ )

$\psi$  : Coefficient prenant en compte l'épaisseur totale de renfort

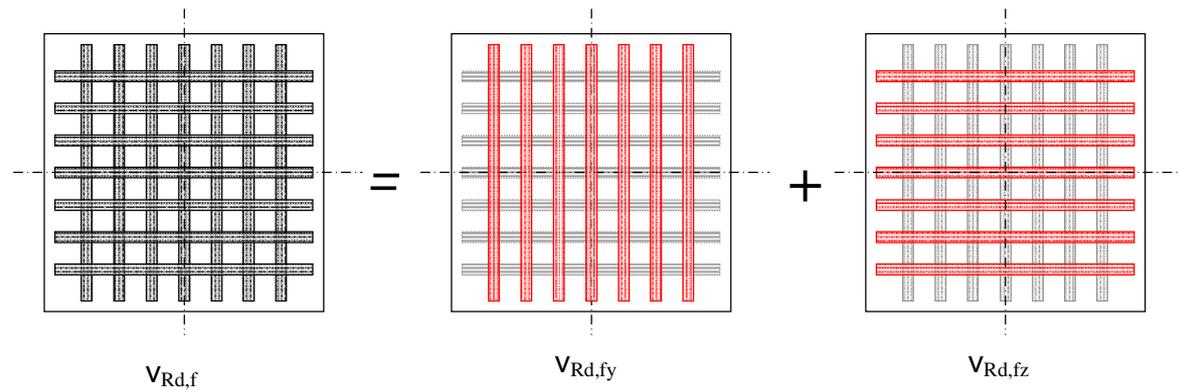


Figure 2.7.5 : Calcul de la résistance au poinçonnement des renforts composites

### Détermination des coefficients

Le coefficient  $\psi$ , fonction de l'épaisseur de renforts composites  $n_f \times t_f$  mise en place, est déterminé à l'aide du tableau suivant :

<i>Epaisseur totale [mm]</i>	1	2	3	4	5
$\psi$	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5

$\gamma_f$  : Coefficient de sécurité ( $\gamma_f = 1,15$ )

$\chi$  : Coefficient fonction du type de renfort

$\chi = 1$  renfort de type stratifié au contact

$\chi = 2,5$  renfort pultrudé

Au moment de la ruine de la structure, la résistance au poinçonnement totale  $V_{Rd,cf}$  le long du contour de contrôle doit rester inférieure ou égale à la contrainte de cisaillement de calcul prenant en compte l'effort appliqué sur la dalle  $v_{Ed}$ , exprimé par l'équation suivante :

$$= \frac{v_{Ed}}{u_1 \cdot d_{eff}}$$

avec :

$v_{Ed}$  : contrainte de calcul de la contrainte de cisaillement liée à l'application du chargement ponctuel [MPa]

$V_{Ed}$  : Effort de poinçonnement appliqué [MN]

$\beta$  : Coefficient prenant en compte le positionnement de la charge sur la dalle. Les valeurs du coefficient  $\beta$  sont définies par les annexes nationales de l'Eurocode 2. En France celle-ci reprend les, les valeurs recommandées dans l'Eurocode 2, et rappelées sur la figure suivante :

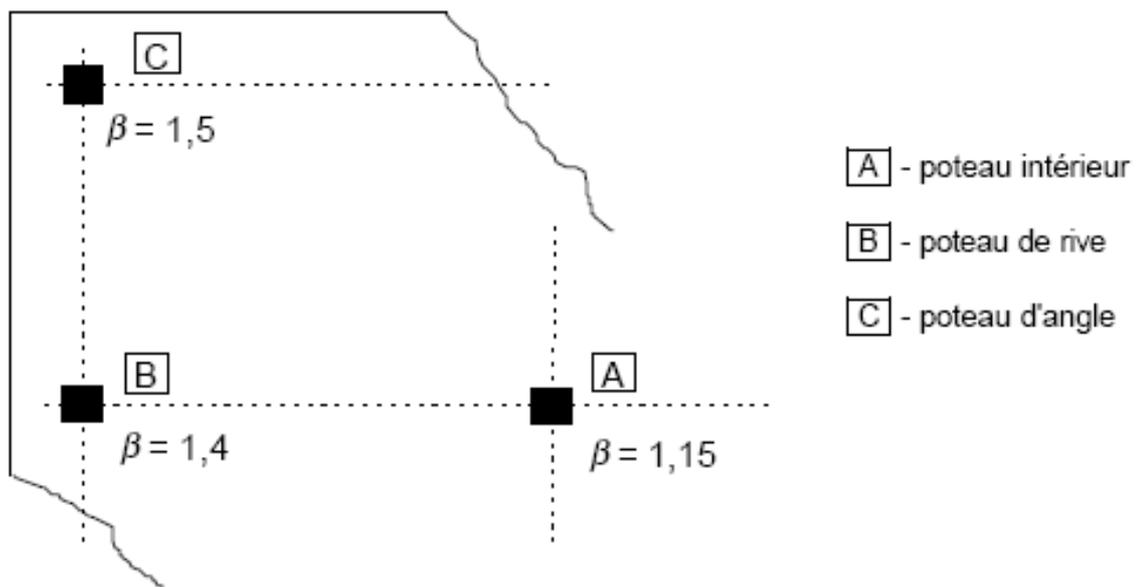
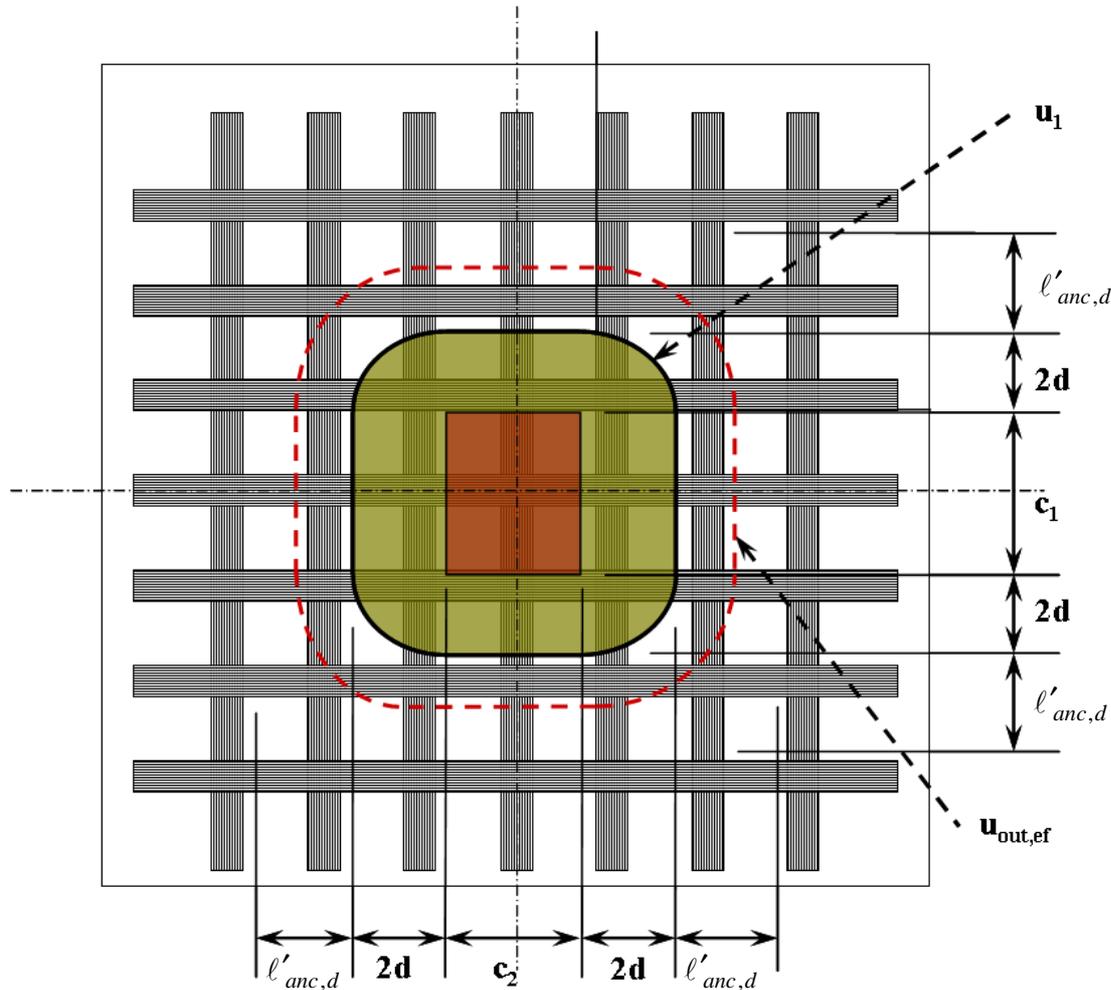


Figure 2.7.6 : Valeur recommandée par l'Eurocode 2 pour le coefficient  $\beta$

La vérification de non poinçonnement doit satisfaire l'équation :

$$V_{Ed} < V_{Rd,cf} \quad (2.7.18)$$

La poursuite des calculs sera conduite suivant les règles de l'Eurocode 2 (§ 6.4.4 ou 6.4.5). On respectera des dispositions constructives en prolongeant les armatures composites d'une longueur  $l'_{anc,d}$  au delà du contour de contrôle externe.



$l'_{anc,d}$  est définie par les dispositions constructives.

Figure 2.7.7 : Définition du périmètre de contrôle externe ( $u_{out,ef}$ )

### 2.8.5 Dispositions constructives

Pour des raisons d'ancrage, les bandes composites ou le tissu composite doivent être continués sur une longueur d'ancrage minimum. Cette longueur d'ancrage  $l'_{anc,d}$  de part et d'autre du périmètre de contour est déterminée conformément au paragraphe 2.5 des recommandations AFGC et doivent être au minimum égale à deux fois la plus grande des dimensions du périmètre de contour lorsque celui-ci n'est pas circulaire et au moins égale au terme  $2d$  lorsque le périmètre critique est circulaire.

$$l'_{anc,d} = \max \left\{ l_{anc,d} ; 2 \cdot (\max(c_1, c_2) + 2d) \right\}$$

Dans le cas où la longueur d'ancrage calculée serait impossible à appliquer in-situ, des dispositions constructives particulières pourront être appliquées, notamment en ayant recours à des procédés d'ancrage différents faisant l'objet d'une justification particulière.

Dans le cas du renforcement par bandes croisées, pour éviter les amorces de décollement au niveau des zones d'entrecroisement, on veillera à respecter les préconisations de mises en œuvre admissibles définies pour chaque procédé (chapitre 3 des recommandations AFGC). Dans l'absence de données, il sera impératif de réaliser des essais visant à évaluer les propriétés mécaniques de l'interface composite-béton (paragraphe 1 des recommandations AFGC) en imposant une épaisseur d'interface égale à la surépaisseur du plat.

### ***2.7.6 Références bibliographiques***

- [1] ***P. MENETREY*** ; Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures ; these EPFL; 1994.
- [2] ***S. GUANDALINI*** ; Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé ; Thèse EPFL N°3380 ; 2005.
- [3] ***E.H. ROCHDI, D. BIGAUD, E. FERRIER, P. HAMELIN*** ; Ultimate behaviour of CFRP strengthened RC flat slabs under a centrally applied load. Composite Structures. 72(2006)69-78.
- [4] ***L. MICHEL, E. FERRIER, D. BIGAUD, A. AGBOSSOU*** ; "Criteria for Punching Failure Mode in RC Slabs Reinforced by Externally Bonded CFRP". Journal of Composite Structures, Elsevier ed., Volume 81, Issue 3, December 2007, Pages 438-449.

## ***2.8 Justification concernant le confinement de poteaux de section circulaire ou rectangulaire par matériaux composites soumis à de la compression centrée***

### ***2.8.1 Aspect technologique : technique de renforcement***

#### **Principe du confinement**

L'objectif d'un confinement par matériaux composites est d'augmenter l'effort normal que peut supporter un poteau sain ou endommagé. L'application circonférentielle de renforts en matériaux composites permet, en limitant les déformations transverses du béton, de modifier de façon significative le comportement en compression des poteaux. Le principal effet du confinement est un accroissement de la capacité portante du poteau qu'il est possible d'évaluer avec les règles de dimensionnement proposées dans ce fascicule.

#### **Configuration des renforts**

Quatre types de renforcement peuvent être envisagés dans le cas des poteaux : le confinement discontinu (renforcement réalisé avec des bandes de composites espacées et éventuellement inclinées) ou total (toute la surface est recouverte par le composite), avec renfort longitudinal ou non (fig. 2.8.1).

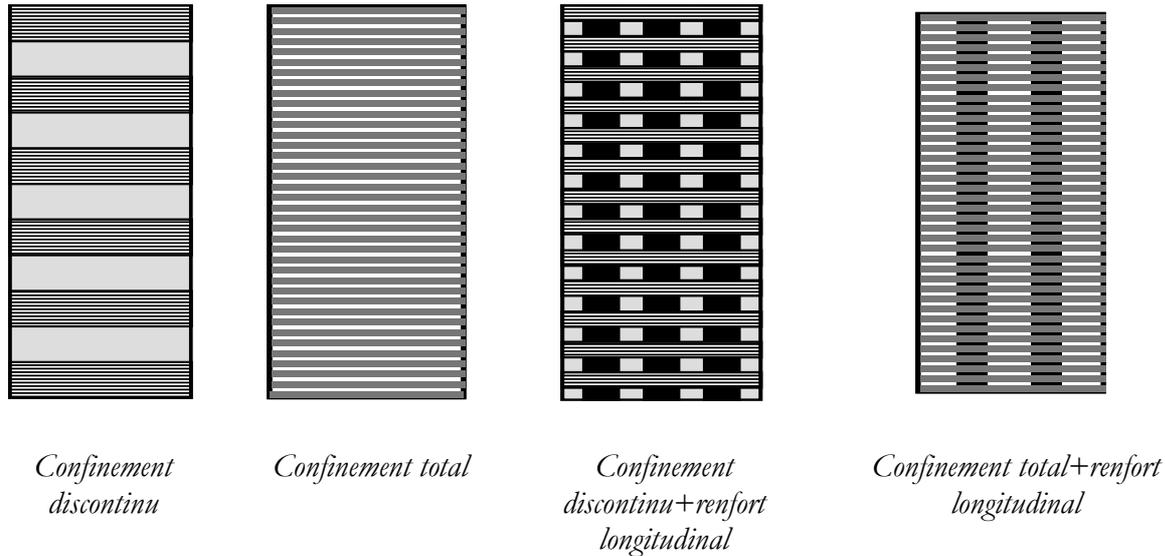


Figure 2.8.1. Les différentes configurations de renforcement

### 2.8.2 Règles de dimensionnement

#### Domaine d'application de la méthode

Tous les principes généraux énoncés dans les chapitres précédents doivent être respectés.

Les valeurs des différents coefficients proposés tiennent compte de l'état actuel des connaissances. Ils pourront évoluer à partir de justifications ultérieures.

#### Élancement

La procédure de dimensionnement concerne uniquement des poteaux de section circulaire, carrée ou rectangulaire (dans la limite où le grand côté  $b$  est inférieur ou égal à 1.5 fois le petit côté  $a$ ) et dont l'élançement est réduit. Pour que la méthode s'applique, les poteaux devront vérifier la condition suivante :

$$\lambda \leq 50 \quad \lambda \text{ calculé suivant les règles de l'Eurocode pour les poteaux non renforcés par composite}$$

L'extension de la méthode de dimensionnement pour des valeurs d'élançement supérieures à 50 devra faire l'objet de vérifications supplémentaires.

Cette procédure de dimensionnement permet de prendre en considération l'effet du confinement et du renfort axial sur la capacité portante du poteau. Le chargement appliqué doit être centré ou appliqué avec une excentricité inférieure ou égale à 2 cm.

#### Conditions de continuité

Pour que ces règles soient applicables, les poteaux devront respecter les dispositions constructives proposées (cf. §4.1 à 4.4), et notamment les conditions sur les longueurs de recouvrement et rayons de courbure des renforts.

#### Prise en compte du confinement dans le calcul de la résistance ultime du béton

La pression de confinement  $f_l$  provenant du renfort en composite s'exprime comme suit:

$$f_l = E_p \varepsilon_{fud} \quad (2.8.1)$$

Avec la déformation à rupture du composite  $\varepsilon_{fud}$  et le module de confinement  $E_p$ , qui traduit la rigidité du confinement, évalué par les expressions suivantes :

$$E_p = \frac{2t_f n_p}{D} E_f \quad (2.8.2)$$

pour une section circulaire

$$E_p = \frac{2t_f n_p}{b} E_f \quad (2.8.3)$$

pour une section rectangulaire

avec  $E_f$  le module d'élasticité de traction du composite,  $t_f$  son épaisseur, et  $b$  et  $D$  respectivement le grand coté pour un poteau de section rectangulaire et le diamètre pour une section circulaire.

La résistance en compression du béton confiné est alors calculée avec l'expression suivante :

$$f_{cd,c} = f_{cd} + \psi_f \alpha k_c k_h f_l \quad (2.8.4)$$

avec,  $f_{cd,c}$  la résistance de calcul en compression du béton confiné,  $f_{cd}$  la résistance de calcul en compression du béton et  $\alpha$  le coefficient d'efficacité du confinement.  $k_c$  et  $k_h$  sont des coefficients minorateurs dont les expressions sont données par les relations 2.7.5, 2.7.6 et 2.7.7. Le coefficient de performance  $\psi_f$  est fonction de la forme de la section du poteau. En l'absence de toute autre justification, il est donné dans un premier temps, par :

$\psi_f=0.8$  pour une section circulaire

$\psi_f=0.6$  pour une section rectangulaire (avec  $R$  tel que  $R \geq 35\text{mm}$ )

Pour un béton d'usage courant,  $\alpha$  le coefficient d'efficacité du confinement, est évalué à :

$$\alpha=3,45 \quad f_{ck} \leq 60\text{MPa} \quad (2.8.5)$$

Dans les poteaux de section circulaire, la pression de confinement est considérée uniforme. Par contre, dans le cas des poteaux présentant des sections rectangulaires ou carrées, seule une partie du noyau de béton est effectivement confinée suivant le schéma ci-dessous, ce qui réduit l'efficacité du confinement (cf. figure 2.8.2).

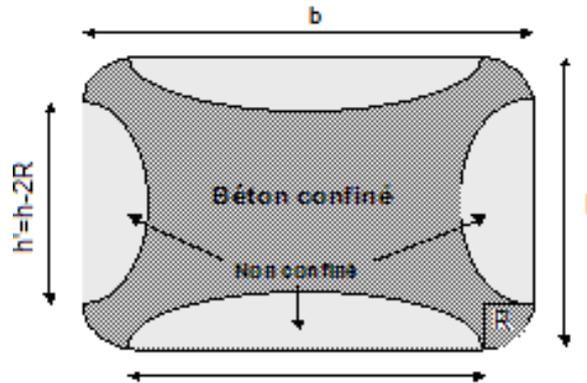


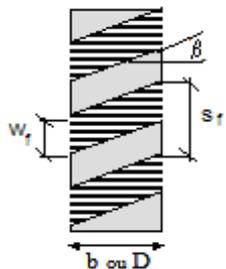
Figure 2.8.2. Distribution non uniforme de la pression de confinement sur une section

En conséquence, le coefficient  $k_c$  de l'expression 2.8.4 prend en considération la géométrie du poteau.

$$k_c = 1 - \frac{h^2 + b^2}{3A_c} \quad (\text{Section rectangulaire}) \quad (2.8.6)$$

$$k_c = 1 \quad (\text{Section circulaire}) \quad (2.8.7)$$

Pour un confinement discontinu, la pression de confinement  $f_1$  n'est pas uniforme sur la hauteur du poteau. Cet effet est intégré par le coefficient  $k_h$  coefficients qui prend en compte la largeur des renforts composites  $w_f$ , leur espacement  $s_f$  et leur orientation (angle d'inclinaison  $\beta$ ).



Section circulaire :

$$k_h = \frac{1}{1 + \frac{s_f}{\pi D}} \left( \frac{1 - \frac{s_f - w_f}{2D}}{1 - \rho_l} \right) \quad (2.8.8)$$

Section rectangulaire :

$$k_h = \frac{\left( 1 - \frac{s_f - w_f}{2h} \right) \left( 1 - \frac{s_f - w_f}{2b} \right)}{1 - \rho_l} \quad (2.8.9)$$

Avec  $\rho_l$  le taux de ferrailage longitudinal ( $A_s/A_c$ ), avec  $s_f$  fonction de  $\beta$  l'angle d'inclinaison des bandes et  $b$ , la longueur droite du côté ( $b'=b-2R$ ). Pour un confinement total (continu), on considérera  $k_h=1$ .

### Calcul de la portance d'un poteau confiné

La charge maximum que peut reprendre un poteau confiné est donnée par :

$$N_{Rd} \leq \gamma_\lambda [A_c f_{cd,c} + A_s f_{yd}] \quad (2.8.10)$$

Avec  $\gamma_\lambda$ , un coefficient qui dépend de l'élançement et donné par :

$$\gamma_{\lambda} = \frac{0,85}{1 + 0,2 \left( \frac{\lambda}{35} \right)^2} \quad (2.8.11)$$

pour  $\lambda \leq 50$

### **2.8.3 Etapes du dimensionnement**

On s'assure que le poteau satisfait la condition suivante :

$$\lambda \leq 50 \quad (2.8.12)$$

On calcule la résistance moyenne du béton confiné qui permettra de reprendre la charge demandée :

$$f_{cd,c} = \frac{1}{A_c} \left( \frac{N_{Rd}}{\gamma_{\lambda}} - A_s f_{yd} \right) \quad (2.8.13)$$

On en déduit la pression de confinement requise :

$$f_1 = \frac{f_{cd,c} - f_{cd}}{\psi_f k_c k_h \alpha} \quad (2.8.14)$$

On calcule le nombre de plis nécessaire :

$$n_p \geq \frac{D f_1}{2 t_f E_f \varepsilon_{fud}} \quad \text{Pour une section circulaire} \quad (2.8.15)$$

$$n_p \geq \frac{b f_1}{2 t_f E_f \varepsilon_{fud}} \quad \text{Pour une section carrée} \quad (2.8.16)$$

### **2.8.4 Dispositions constructives**

#### **Préparation du support et application des renforts**

La préparation du support doit être conforme aux recommandations de l'AFGC (cf. § 3.1.2 ; § 3.2 & 3.3). Dans tous les cas, les prescriptions de mise en œuvre figurant sur les documentations techniques des fournisseurs doivent être respectées.

#### **Rayon de courbure des composites**

Les angles des poteaux doivent être préparés de manière satisfaire un rayon de courbure  $r_c$  supérieur à 35 mm sauf disposition particulière liée au procédé.

$$R \geq 35 \text{ mm} \quad (2.8.17)$$

Avec  $R$  : rayon de courbure du composite.

### Espacement des bandes de renfort

L'espacement maximal des bandes de renfort  $s_f - w_f$  devra être limité à la plus petite des valeurs :

40 cm,

$15 \Phi$  où  $\Phi$  représente le diamètre minimal des armatures longitudinales comprimées (afin de limiter le risque de flambement de ces armatures),  
distance entre les cadres d'armatures transversales.

$$\text{Soit : } s_f - w_f < \min\{40\text{cm}; 15\Phi; s\} \quad (2.8.18)$$

### 2.8.5 Conditions d'ancrage et longueurs de recouvrement des composites

➤ Un soin particulier doit être apporté à la zone de recouvrement du composite, laquelle assure l'ancrage du renfort. Dans tous les cas, une longueur de recouvrement pli sur pli supérieur à 10 cm est souhaitable. Dans le cas d'un composite de forte épaisseur, des essais de cisaillement inter-laminaire seront mis en œuvre pour vérifier la continuité du renfort (§1.11.4). Afin d'écartier toute rupture par décollement/cisaillement interlaminaire, la longueur de recouvrement devra vérifier la condition suivante :

$$l_{\text{rec}} \geq \max\left\{\frac{f_{\text{fu}} t_f}{\tau_{\text{fd}}}; 10\text{cm}\right\} \quad (2.8.19)$$

$l_{\text{rec}}$  : longueur de recouvrement,  $f_{\text{fu}}$  : résistance en traction du composite,  $t_f$  : épaisseur du composite,  $\tau_{\text{fd}}$  : contrainte de cisaillement interlaminaire du composite.

Dans le cas d'un confinement avec renforts inclinés (renforcement en spirale), l'ancrage du composite doit être complété par un renfort horizontal continu (au sommet et à la base du poteau), ancré suivant la condition précédente, et dont la largeur est au moins égale à  $w_f$

Le renfort longitudinal sera toujours placé sous l'enveloppe de confinement, cette dernière améliorant considérablement son ancrage.



Réparation et renforcement des structures en béton au moyen  
des matériaux composites

## **CHAPITRE III**

### **MISE EN ŒUVRE *IN SITU* DES MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LE RENFORCEMENT**

3.1.	Préparation du support béton	97
3.2.	Conditions climatiques et d'environnement à la mise en œuvre	98
3.3	Technologie (cf. annexe chapitre III pour les fiches propres à chacun des procédés)	100
3.4.	Qualification du personnel des entreprises applicatrices	106
3.5.	Hygiène et sécurité	106

### **3.1 Préparation du support béton**

#### **3.1.1 Qualité et résistance du béton**

La surface du béton doit présenter une cohésion superficielle supérieure ou égale 1,5 MPa\* en l'absence de justifications particulières.

Les dégradations\*\* superficielles du béton seront réparées suivant la norme NFP 95-101.

Les anciennes réparations et les "ragréages" défectueux\*\*\* seront complètement éliminés et réparés suivant la norme NFP 95-101.

Les arrivées d'eau avant et pendant la mise en œuvre seront éliminées.

*\*La cohésion superficielle sera mesurée suivant l'essai Satec décrit dans la norme P18852.*

*\*\* Les dégradations internes non visibles (manque de compacité, carbonatation, présence de chlorures, etc...) ne sont pas visées dans le texte.*

*\*\*\* Une réparation ou "ragréage" est considérée comme défectueux si son adhérence est inférieure à la cohésion superficielle du béton.*

#### **3.1.2 Peau continue**

L'épiderme du béton doit être continu. Les opérations suivantes doivent être effectuées :

- Assainir le béton par élimination des corps étrangers et zones ségréguées, repiquer la surface des cavités, couper les excroissances et annuler par meulage les balèvres.
- Obturer toutes les cavités à l'aide d'un mortier de réparation à base de liant hydraulique admis à la marque NF\* et compatible avec le procédé.
- Effectuer un bouche-pore du support à l'aide du produit de "ragréage" compatible avec le système de réparation\*\*.
- Injecter les fissures d'ouverture supérieures à 0,3 mm à l'aide d'un produit adapté. Les travaux s'effectuent conformément à la norme NFP 95-103.
- Les arêtes seront abattues par meulage pour former un congé d'au moins 1 cm de côté.

*\* La cavité peut également être obturée à l'aide d'un mortier de résine défini dans le cahier des charges du procédé.*

*\*\* Cette opération devra être effectuée après la préparation du support (§ 4) pour permettre l'ouverture des bulles et éviter l'effet piston.*

*Lors des différentes opérations de renforcement, on veillera à ne pas faire travailler le composite en compression au droit d'une fissure qui n'aurait pas été traitée pour restituer le monolithisme de l'ouvrage.*

#### **3.1.3 Planéité du support**

La surface du béton qui reçoit le renfort doit présenter au minimum les tolérances de formes d'un parement simple suivant l'article 52.2.1 du fascicule N°65-A.

- Les reprises de planéité seront exécutées à l'aide de :
  - mortier de réparation à base de liant hydraulique admis à la marque NF,
  - pâte époxydique ou mortier de résine compatible avec l'adhésif.

Les produits de re-profilage devront être parfaitement adhérents au support\* et avoir un module d'élasticité supérieur ou égal à celui du béton\*\*.

- La surface ragrée devra être inférieure à 20 % de la surface collée. Dans le cas de dépassement de cette valeur, l'entrepreneur doit en informer le maître d'œuvre pour définir la conduite à tenir.

*\* L'adhérence des re-profilages sera au moins égale à la cohésion superficielle du béton qui est généralement supérieure ou égale à 1,5 MPa.*

*\*\* Cette condition permet d'assurer la rupture par cisaillement dans le béton.*

*NB : Si les conditions de «parement simple» ne sont pas respectées des justificatifs sont à fournir (poussée au vide...).*

### **3.1.4 Courbure admissible du support**

Chaque procédé définit, dans son cahier des charges, les rayons de courbure admissible.

### **3.1.5 Préparation du support béton**

Le support béton fera obligatoirement l'objet d'une préparation de surface de manière à optimiser les forces de liaison adhésif/béton\*.

Cette préparation ne doit pas affaiblir la surface du béton mais :

- créer une rugosité de surface,
- rendre la surface chimiquement propre\*,
- retirer la laitance superficielle et éliminer tous revêtements.

Parmi les techniques utilisables, on peut recommander le sablage à sec ou à défaut :

- sablage humide\*\*,
- lavage à l'eau sous très haute pression\*\*,
- ponçage au disque diamanté suivi d'une aspiration.

Les techniques qui créent des micro-fissurations dans le béton seront proscrites (bouchardage, burinage, décapage thermique, etc...).

La cohésion superficielle du béton après préparation devra être supérieure ou égale à celle minimum prise en compte dans la note de dimensionnement.

*\* L'angle de raccordement de l'adhésif avec la surface diminue avec son degré de propreté. Le support doit donc être débarrassé de corps tels qu'huiles, graisses, sels et tous produits qui modifient les propriétés de mouillage.*

*\*\* Un séchage du support est nécessaire.*

## **3.2 Conditions climatiques et d'environnement à la mise en œuvre**

### **3.2.1 Mise en œuvre des résines**

Elle n'est permise que dans les conditions climatiques suivantes :

- temps calme\*,
- le poste de collage doit être à l'abri de la pluie et de tout ruissellement,

- température minimale du support + 5° C\*\*,
- pour éviter toute condensation sur les supports, la température du support doit être supérieure de + 3° C à celle du point de rosée,
- au-dessus de 80 % d'humidité relative, la fréquence des contrôles de condensation doit être augmentée\*\*\*.

*\* Le vent amène des poussières, feuilles, débris dans la résine et une variation rapide de la température.*

*\*\* En-dessous il peut y avoir formation de glace ou de givre sur le support.*

*\*\*\* Au-dessus de 80 % d'humidité relative la garde des + 3° C n'est plus assurée.*

### **3.2.2 Stockage des matériaux**

Les matériaux (résines et fibres) doivent être stockés dans un abri chauffé ou ventilé pour être conservés aux températures optimales données dans la fiche technique du procédé.

### **3.2.3 Températures de mise en œuvre des résines**

Elles doivent rester dans l'intervalle donné dans la fiche technique du procédé pour permettre :

- une mise en œuvre à la viscosité recommandée par le fabricant\*,
- d'avoir une DPU suffisante pour effectuer correctement les opérations nécessaires à la bonne pose du renfort (marouflage, enduit),
- une polymérisation correcte et une bonne adhérence\*\*,
- le non-dépassement de la température maximale recommandée par le fabricant.

*\* Une forte viscosité (temps froid) ne permet pas une mise en œuvre correcte de la résine (épaisseur non régulière du film de colle, défaut d'imprégnation des tissus, etc...).*

*\*\* Certaines résines forment, à faible température, des pellicules qui nuisent à l'adhérence.*

### **3.2.4 Environnement et organisation d'un chantier d'application**

Le phasage (préparation du support-collage) doit être organisé pour que la poussière dégagée par la préparation du support ne vienne pas dans le poste de collage\*.

D'autres corps d'état ne doivent pas intervenir s'ils risquent d'envoyer des contaminants dans la zone de collage\*.

*\* L'interposition de poussières, d'humidité ou autre contaminant entre la résine et ses supports, nuit à l'adhérence.*

### **3.2.5 Conditions de circulation à la mise en œuvre**

A priori l'ensemble des recommandations considère une intervention de renforcement ou de réparation à vide ou sans circulation.

La mise en œuvre des composites sous circulation devra faire l'objet de justifications complémentaires précisant l'absence d'influence sur le mode de durcissement et de maturation des polymères, le niveau de déformation imposé ou composite, la conservation des propriétés mécanique de l'interface.

### 3.3 Technologie

Chaque procédé dispose d'une fiche technique établie sur la base du modèle suivant :

**KIT : FICHE TECHNIQUE TYPE**

**NOM DU PROCÉDÉ :**

**DOMAINE D'APPLICATION :**

**FIBRES DE RENFORCEMENT**

**Nature :**

**Type :**

**Nombre de filaments :**

**Référence :**

**Provenance :**

**RÉSINES**

**Composite (confection)**

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

**Interfaces (adhésif)**

Béton – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

Composite – composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

Composite – couches de finition

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

**Spécifications (cf. chapitre I pour leur détermination)**

Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
TG : température de transition vitreuse (°C)			
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> <li>• durcisseur</li> <li>• résine</li> </ul>			
DPU (durée pratique d'utilisation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5°C</li> <li>• 10°C</li> <li>• 15°C</li> <li>• 20°C</li> <li>• 25°C</li> <li>• 30°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>			
Température de mise en œuvre			
Viscosité			
Dureté shore D ou Barcoll <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 heures</li> <li>• 2 jours</li> <li>• 7 jours</li> </ul>			
Résistance à la traction Allongement à la rupture			
Résistance au cisaillement Résistance à la compression			
Résistance à la flexion			
Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E compression</li> </ul>			
Adhérence <ul style="list-style-type: none"> <li>• sur béton sable sec</li> <li>• sur béton sable humide</li> </ul>			

**Conditionnement / Stockage**

**COUCHES DE FINITION**

A préciser

**TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ**

**Pultrudé**

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> OUI                     | <input type="checkbox"/> NON                 |
| <input type="checkbox"/> BD (bidirectionnel)     | } Epaisseur :<br>Grammage :<br>Orientation : |
| <input type="checkbox"/> UD (unidirectionnel)    |  |
| <input type="checkbox"/> Autres renseignements : |  |

**Tissu sec**

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> OUI                     | <input type="checkbox"/> NON                 |
| <input type="checkbox"/> BD (bidirectionnel)     | } Epaisseur :<br>Grammage :<br>Orientation : |
| <input type="checkbox"/> UD (unidirectionnel)    |  |
| <input type="checkbox"/> Autres renseignements : |  |

**Pré-imprégné**

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> OUI                     | <input type="checkbox"/> NON                 |
| <input type="checkbox"/> BD (bidirectionnel)     | } Epaisseur :<br>Grammage :<br>Orientation : |
| <input type="checkbox"/> UD (unidirectionnel)    |  |
| <input type="checkbox"/> Autres renseignements : |  |

### Conditionnement

Rouleaux : Diamètre : caisse en bois pour les rouleaux de 250 mètres

Largeur :

Autres :

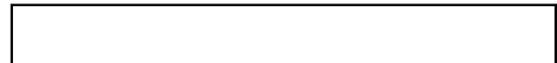
### Stockage

Durée de conservation illimitée à l'abri d'une exposition directe au soleil

### COMPOSITE REALISÉ *IN SITU* (cf. chapitre I)

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas  
(le haut correspond à la partie à renforcer)

Béton



Colle



Composite



### Caractéristiques (valeurs minimales garanties)

Désignation	Norme	Caractéristiques
Module d'élasticité - traction		
Contrainte à la rupture – traction		
Epaisseur nominale		
Allongement à la rupture – traction		
Résistance interlaminaire au cisaillement		
Résistance au cisaillement par couche		



Réparation et renforcement des structures en béton au moyen  
des matériaux composites

**Nombre de couches**      mini  
   maxi

**Limites**              Température

Humidité du support

Croisement

Rayon de courbure mini

Autres

**Spécificités du produit**

Avantages

Inconvénients

Application sur ouvrages en service

Autres

**MISE EN ŒUVRE DES DIFFERENTS PROCÉDÉS :  
CADRE DE FICHE TECHNIQUE**

La préparation du support étant déjà réalisée et réceptionnée, les différentes étapes du procédé mis en œuvre sont décrites par l'applicateur du KIT dans les moindres détails.

Les procédures internes correspondantes sont systématiquement fournies pour chaque chantier.

Les points d'arrêt sont également précisés.

Compte tenu de l'expérience des applicateurs, des éléments complémentaires au KIT sont appréciés, à savoir :

- 1/ l'esthétique
- 2/ la protection mécanique adhérente
- 3/ la protection au feu
- 4/ la protection contre les chocs et l'abrasion
- 5/ la finition et les revêtements associés
- 6/ autres

Des références ainsi que des procès-verbaux d'essais peuvent valider ces informations.

### ***3.4 Qualification du personnel des entreprises applicatrices***

Le renforcement de structures à l'aide de matériaux composites est effectué sous la direction d'un responsable spécialement qualifié, dit C.A.R.C. (Chargé d'Application de Renforcements Composites) dont la compétence est reconnue par l'entreprise applicatrice du KIT utilisé ; il en est justifié auprès du maître d'œuvre (consistance minimale et détails de la mission du C.A.R.C.).

Le plan d'assurance qualité (PAQ) du chantier de renforcement comporte dans son article consacré à l'organisation du chantier :

- la mention de l'origine et des références du personnel responsable des opérations de renforcement à l'aide de matériaux composites,
- la désignation du "chargé d'application de renforcements composites" C.A.R.C.

Les compétences du C.A.R.C. permettent au moins :

- le contrôle préalable du support et sa préparation,
- l'exécution dans le respect des prescriptions du procédé.

Les entreprises applicatrices appartiennent aux "Entreprises Générales de France BTP" (EGF-BTP 9, rue de la Pérouse 75116 - PARIS Tél. : 01 40 69 52 78).

Les " Entreprises Générales de France BTP " assurent la qualification des C.A.R.C. selon un programme de formation préalablement défini.

### ***3.5 Hygiène et sécurité***

Indépendamment des commentaires figurant ci-dessous, les recommandations portant sur les conditions d'hygiène et de sécurité devront respecter la législation européenne sur la sécurité.

#### ***3.5.1 Structures à renforcer***

Ce paragraphe a pour objet de décrire les spécificités concernant les risques Sécurité et Santé, y compris pendant le traitement du support des renforts à encoller.

Il ne décrit pas toutes les mesures habituelles à prendre pour tout chantier, mais insiste tout de même sur les points à risque pour qu'ils ne soient pas oubliés.

La présentation se fait sous forme d'un Inventaire et Evaluation des Risques Sécurité et Santé, [Référence OPPBTP : Guide Pratique A 1 G 09/96 : "le Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé (PPSPS) et 18 Aides-Mémoire Techniques".]

A titre d'exemple, l'annexe ci-après constitue un projet d'évaluation des risques et de mise en place des moyens de prévention correspondants.

L'évaluation des risques pour le PPSPS peut par exemple être basée sur la méthode «Kinney» qui consiste, pour chaque risque lié à la réalisation d'une tâche, à calculer la valeur de l'indice de risque à partir de trois valeurs représentant :

- l'importance des dégâts possibles dus au risque, notée E,
- la fréquence de l'exposition au risque, notée B,
- la probabilité de survenance du risque, notée W.

L'estimation de ces valeurs est reprise dans le tableau suivant :

Valeur	Explication
<b>E =</b>	<b>IMPORTANTES DES DÉGATS POSSIBLES DUS AU RISQUE</b>
100	Grande catastrophe : de nombreuses victimes et morts
40	Catastrophe : plusieurs victimes et morts
15	Très grave : accident mortel
7	Considérable : accident grave, risque d'incapacité permanente
3	Important : accident avec arrêt, risque d'incapacité temporaire
1	Significatif : accident sans arrêt mais avec soins
<b>B =</b>	<b>FRÉQUENCE DE L'EXPOSITION AU RISQUE</b>
10	Permanente
6	Quotidiennement pendant les heures de travail
3	Une fois par semaine ou occasionnellement
2	Mensuellement
1	Quelques fois par an
0.5	Très rarement
<b>W =</b>	<b>PROBABILITÉ DE SURVENANCE AU RISQUE</b>
10	Peut être attendu, presque certain
6	Fort possible
3	Inhabituel, mais possible
1	Seulement possible à long terme
0.5	Peut être envisagé, mais très improbable
0.2	Pratiquement impossible
0.1	Virtuellement possible

L'indice de risque se calcule en multipliant ces trois valeurs entre elles :  $R = E \times B \times W$ .

Le tableau ci-après donne en fonction du résultat du calcul la priorité des mesures à prendre.

Valeur	Explication
$R = E \times B \times W =$	<b>VALEUR DE L'ÉVALUATION DU RISQUE</b>
$R > 320$	Très haut risque : envisager l'arrêt de l'activité
$320 > R > 160$	Haut risque : exiger des mesures immédiates
$160 > R > 70$	Risque important : mettre en œuvre des protections individuelles et/ou collectives spécifiques adaptées
$70 > R > 20$	Risque possible : mettre en œuvre des protections individuelles et/ou collectives spécifiques adaptées
$20 > R$	Risque faible : utilisation des EPI indispensable

La nature des risques est indiquée :

I = risques importés

E = risques exportés

C = risques créés par les salariés de l'Entreprise exécutante

**Plan particulier de sécurité et de protection de la santé**

Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique - Evaluation des risques

Mode opératoire		Description des risques Croquis éventuels	Valeurs			Evaluation	Nature			Moyens de prévention Croquis éventuels	
Description des tâches	Moyens		E	B	W	R	I	E	C		
Mise en place et utilisation de la plate-forme de travail	au sol										
	échafaudage roulant									règles habituelles relatives à ces engins	
	nacelle										
	échafaudage classique		renversement de l'échafaudage								rappel des bonnes mesures : - échafaudage stabilisé - éléments verrouillés entre eux, - roues bloquées, - installé sur un sol plan, - contrôles périodiques
			chutes de personnes								gardes-corps constitués de lisses et sous-lisses
			chutes de matériels et matériaux								protections collectives plinthes
			dépassement de capacités de charges								indicateurs de charge maximum
			accès à l'échafaudage : risque de chute								aménagement du seuil d'accès et protection de l'accès suivant hauteur
pour les ouvrages d'art : nacelle mobile sur véhicule									- conformité aux règles d'utilisation et mode opératoire pour chaque nacelle - protection vis-à-vis de la circulation		
Mise en place et utilisation de la plate-forme de travail sous exploitation de l'ouvrage (parkings, ponts)		risques dus à la circulation des véhicules								- protection avec l'aide des services compétents (police, gendarmerie, DDE, communes, départements) pour les parkings - protection avec l'aide de l'exploitant dans le cas des parkings	
Travaux sur la plate-forme de travail Manutention de matériels et de matériaux		déséquilibre et chute des charges, des moyens de levage, rupture de pièces ou moyens de levage, surcharge								- dispositifs de prévention usuels - guidage des charges, vérification des appareils de levage, des charges - utilisation de harnais de sécurité si travaux en hauteur	

**Plan particulier de sécurité et de protection de la santé**

Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites à matrice organique - Evaluation des risques

Mode opératoire		Description des risques Croquis éventuels	Valeurs			Eval uati on	Nature			Moyens de prévention Croquis éventuels
Description des tâches	Moyens		E	B	W	R	I	E	C	
Purge des surfaces du béton	suivant norme 95101 également appliquée au bâtiment marteau et burin, marteau-piqueur, nettoyeur haute pression, air comprimé, sciages	protections, poussières, inhalation, bruits, rupture flexibles, projections d'eau  risque de chute si grande hauteur  travaux en zones fermées (bâtiments, caissons) : intoxications au gaz								port des EPI : casques, lunettes, gants, chaussures de sécurité, masques, combinaisons  utilisation de harnais de sécurité  vérification de la qualité de l'air avant exécution aération naturelle : ouverture de fenêtres ou ventilation forcée
Réparation et préparation des surfaces	suivant norme 95101 également appliquée au bâtiment - après nettoyage, brossage, aspiration, soufflage, lavage à l'eau - utilisation de produits à base de liant hydraulique modifié, de résine synthétique, avec couche primaire éventuelle - injection de fissures	projections, irritations cutanées, inhalation								port des EPI : casques, lunettes, gants...  conformité stricte aux fiches techniques d'exécution des fournisseurs et aux fiches de sécurité fournies port des EPI
Préparation du support béton, réparé ou non	- sablage sec ou humide ; - lavage à l'eau ou sous très haute pression ; - ponçage au disque diamanté suivi d'une aspiration	protections, poussières, inhalation, bruits, rupture flexibles, projections d'eau ; risque de chute si grande hauteur ; travaux en zones fermées (bâtiments, caissons) : intoxications au gaz								port des EPI : casques, lunettes, gants, chaussures de sécurité, masques, combinaisons ; utilisation de harnais de sécurité ; vérification de la qualité de l'air avant exécution aération naturelle : ouverture de fenêtres ou ventilation forcée.

### **3.5.2 Matériaux de renforcement**

- **Fibres de renforcement**

Tous les produits industriels disponibles sur le marché font l'objet de "fiches de données de sécurité". Ces fiches doivent être conformes à l'arrêté français du 5 janvier 1993 modifié et à la norme française T 01-102 ou à la norme internationale ISO 11014-1.

La fiche de données de sécurité doit fournir les informations spécifiques au produit, en utilisant les 16 rubriques normalisées ci-dessous dont l'intitulé, la numérotation et l'ordre ne peuvent être modifiés :

1. Identification du produit et de la société
2. Composition/information sur les composants
3. Identification des dangers
4. Premiers secours
5. Mesures de lutte contre l'incendie
6. Mesures à prendre en cas de dispersion accidentelle
7. Manipulation et stockage
8. Contrôles de l'exposition/Protection individuelle
9. Propriétés physiques et chimiques
10. Stabilité et réactivité
11. Informations toxicologiques
12. Informations écologiques
13. Considérations relatives à l'élimination
14. Informations relatives au transport
15. Informations réglementaires
16. Autres informations

**Il est de l'obligation du fournisseur de donner une Fiche de Données Sécurité sur simple demande et dans la langue de l'utilisateur.**

- **Résines et durcisseurs**

Les critères d'hygiène et de sécurité dépendent principalement des constituants utilisés.

La fiche de données de sécurité du produit définit les précautions et la prévention des risques liés à l'utilisation du produit (risques R et S).

## **CHAPITRE IV**

### **CONTRÔLES *IN SITU* DES MATÉRIAUX POUR LE RENFORCEMENT**

4.1.	Approvisionnement des matériaux	113
4.2.	Contrôles du renforcement : contrôles internes	114
4.3.	Contrôle extérieur	117
4.4.	Maintenance et suivi du vieillissement	119

#### **4.1 Approvisionnement des matériaux**

A partir d'un référentiel donné l'achat et le contrôle de réception des différents matériaux de base du composite prêt à mettre en œuvre sont régies selon les règles ci-après.

Les produits feront l'objet du marquage CE en conformité avec la norme Européenne EN 1504-4.

##### **4.1.1 Documents de référence**

- Procédure générale des achats dans l'entreprise
- Le bon de commande spécifique à l'achat
- Le bon de livraison spécifique à l'approvisionnement des matériaux constitutifs du composite
- Les certificats de conformité, par lot, des fournisseurs (matériaux renfort et résines)
- Attestation de provenance des matériaux depuis une fabrication certifiée ISO ou possédant un plan d'assurance qualité particulier

##### **4.1.2 Moyens mis en œuvre**

###### **Bon de commande**

Le bon de commande doit comprendre au minimum les renseignements suivants :

- Nom et adresse de livraison
- Nom et adresse de l'ouvrage et la partie de l'ouvrage à renforcer
- Numéro de bon de commande
- Dates de commande et de livraison
- Conséquences entraînées par un retard de livraison ou une non-conformité des matériaux
- Dénomination et nature exacte, conditionnement et quantité du renforcement commandé (longueur, largeur, épaisseur, poids d'un rouleau et nombre de rouleaux)
- Dénomination et nature exacte, conditionnement et quantité des résines commandées (nombre de composants et poids d'un ensemble ; nombre d'ensembles)
- Accusé de réception de commande
- Demande des certificats de conformité

###### **Bon de livraison**

Ce bon de livraison reprendra les mêmes rubriques que le bon de commande. En plus de la conformité du bon de commande au bon de livraison, ce dernier précisera les éléments d'identification et de traçabilité.

Il y sera joint les certificats de conformité (engagement).

###### **Approvisionnement à partir du stock entreprise**

Dans ce cas particulier les ordres internes de commande et de livraisons comporteront les mêmes renseignements que les bons de livraison correspondant en externe.

Le retour des surplus de chantier fera l'objet d'un contrôle visuel de leur état, d'un "bon de retour" indiquant très précisément l'identification des matériaux.

De plus les renforts entamés verront leur étiquetage complété par la quantité restante, et la date de retour et la provenance.

## Contrôles

Les points de contrôle à réaliser sont les suivants :

- Conformité des indications entre le bon de commande, le bon de livraison ou de sortie magasin et les étiquetages en identité, quantité et numéros de lot,
- Etat du renfort par contrôle visuel,
- Date de péremption des résines,
- Etat des bidons de résine avant utilisation.

L'ensemble de ces contrôles fera l'objet d'une formalisation écrite.

## Non-conformité et action corrective

En cas de non-conformité, les matériaux ne sont en aucun cas utilisés.

Une fiche de non-conformité est ouverte.

Une action corrective est formulée auprès du fournisseur.

### *4.2 Contrôles du renforcement : contrôles internes*

Ce chapitre n'aborde que les **contrôles internes**, le diagnostic, la technique par renforcement à l'aide de matériaux composites et les justificatifs correspondants ayant été approuvés au préalable.

Pour un chantier donné les intervenants, les contrôles retenus et leur fréquence sont définis dans un **plan d'exécution et de contrôle** appartenant à l'Entreprise applicatrice et sont effectués dans le cadre de l'autocontrôle.

Les contrôles se distinguent en 3 catégories et seront formalisés sur des fiches.

#### *4.2.1 Constat contradictoire de l'état du support (cf. Annexe 1)*

Il doit être procédé à un constat contradictoire de l'état du support entre les parties concernées de façon à :

- Vérifier la conformité au présent document,
- Vérifier la compatibilité du procédé de renfort retenu avec le support ainsi que les hypothèses de calcul prises en compte.

## Préambule

Les contrôles du constat contradictoire de l'état du support, mentionnés ci-après, sont insuffisants pour faire apparaître les défauts internes de non conformité du béton.

Les opérations de contrôle n'ont pour objet que d'optimiser les techniques de renfort mais ne permettent pas de faire ressortir les vices non apparents et non visitables du béton lui même.

Les éventuels défauts internes (carbonatation, acier corrodé, taux de chlorure élevé, etc ...) doivent avoir fait l'objet d'une étude préalable par des organismes compétents. En l'absence d'une telle étude, l'entrepreneur chargé du renfort supposera que ces défauts internes n'existent pas.

### **Reprise des efforts par le renfort**

Pour que le renfort reprenne les sollicitations pour lequel il est destiné, il est nécessaire de s'assurer que les sollicitations sont conformes aux hypothèses prises en compte dans la note de calcul.

### **Accessibilité du support**

Il faut vérifier que le support est facilement accessible pour exécuter correctement les opérations de préparation du support et la mise en place du renfort. Il faut contrôler l'absence d'obstacle le long du renfort et notamment à ses extrémités.

### **Qualité et résistance du béton**

En l'absence de contrôle possible du cisaillement, cette cohésion est appréciée à partir d'essais de traction directe suivant la Norme P 18852 (voir fiche de contrôle). Cette cohésion superficielle du béton après préparation doit être supérieure ou égale à celle prise en compte dans la note de calcul.

Si le béton présente des dégradations superficielles, elles sont reprises suivant le § II.1 du chapitre Mise en œuvre. En cas de forte dégradation, le maître d'œuvre et le bureau d'études devront statuer sur l'action corrective de la non-conformité enregistrée.

### **Peau continue**

Le support qui reçoit le renfort doit être continu.

Les points suivants doivent être vérifiés :

- absence : de corps étrangers, zones ségréguées, excroissance, cavité, bullage, sinon le support sera mis en conformité suivant le § 3.1.2,
- toutes les fissures d'ouvertures supérieures à 0,3 mm doivent être injectées suivant la norme NFP 95-103,
- les arêtes doivent être abattues par meulage de manière à ne pas présenter de saillie supérieure à celle mentionnée dans le cahier des charges de mise en œuvre du kit concerné,
- les angles rentrants doivent être arrondis sur le rayon spécifié dans la fiche technique du procédé.

### **Planéité du support**

Elle est vérifiée selon le fascicule n°65-A (article 52.2.1).

Les tolérances sur les points singuliers et les courbures sont conformes aux spécifications des kits concernés.

En cas de non-conformité, le support devra être re-profilé suivant les dispositions du § 3.1.3.

### **Humidité du support**

On vérifie visuellement les trois stades suivants :

- qu'il n'y a pas de ruissellement ni de zone humide brillante sinon il convient d'assécher le support et d'éliminer la source d'eau,
- si le support est "SATURÉ MAT", une mesure d'humidité massique est effectuée à l'aide d'un appareil de contrôle à acétylène ; l'humidité ne doit pas dépasser la teneur indiquée dans la fiche technique du procédé,

- si le support est sec, aucun contrôle n'est nécessaire sauf si, compte-tenu de l'exposition de la structure, un doute subsiste ; dans ce cas, une mesure d'humidité massique est à réaliser comme ci-dessus.

#### **4.2.2 Conditions climatiques ou d'environnement**

Il faut s'assurer que l'ensemble des matériaux ne soit pas exposé à la pluie ou à la poussière (vent, préparation du support, présence d'autres corps d'état ...).

Pour permettre la bonne adhérence et polymérisation de l'adhésif, les paramètres suivants sont contrôlés :

- La température du support est au minimum supérieure à + 5° C. La température maximale doit être conforme à celle mentionnée dans le kit.
- Le point de rosée
- Si l'hygrométrie est inférieure à 80 %, le risque de condensation est faible. On vérifiera en début de journée que la température du support est supérieure à 3° C de celle au point de rosée.
- Si l'hygrométrie est supérieure à 80 %, le risque de condensation est élevé et on effectuera la mesure toutes les heures ou on procédera à un enregistrement en continu muni d'un système d'alarme.

#### **4.2.3 Contrôle lors de la mise en œuvre des renforts et après polymérisation de la résine (cf. Annexe 3)**

##### **Contrôle des produits**

On note les numéros des produits livrés pour le renforcement.

##### **Contrôles effectués sur les composants et mélange**

L'adaptation des quantités de résines à mélanger en fonction de la mise en œuvre et des conditions climatiques est précisée dans le système qualité de l'Entreprise.

A cet effet, un essai de convenance est effectué pour vérifier entre autres que le conditionnement des résines est adapté au chantier.

Après l'ouverture des conditionnements il convient de vérifier que la coloration des composants est celle décrite par le fabricant.

En fin de mélange des composants, préalablement stockés selon les recommandations du fabricant, on vérifie l'homogénéité par l'absence de marbrures.

Un prélèvement conservatoire de résine d'une épaisseur d'au moins 3 mm est réalisé pour vérifier l'évolution de la dureté shore D à 48 heures et à 7 jours.

##### **Contrôles lors de la mise en œuvre d'un plat carbone**

Préalablement à l'encollage du plat il convient de vérifier que le marquage de ce dernier sera visible après application.

Le double encollage permet le maintien du plat dès son application.

Lors du marouflage à la roulette, un cordon continu de résine doit apparaître de part et d'autre du plat.

### **Contrôle de la mise en œuvre d'un tissu imprégné sur site**

L'épaisseur de la couche d'encollage sur le support sera contrôlée à l'aide d'un peigne d'épaisseur (possibilité aussi de faire le rapprochement entre la quantité de résine utilisée et la surface couverte). Selon le procédé, vérifier la face à coller.

Lors du marouflage au rouleau débulleur, contrôle visuel du bon ressuage de la résine au travers et sur les côtés de la bande de tissu.

Contrôle visuel de la bonne imprégnation du tissu (brillance à contre jour par exemple)

### **Contrôle de la mise en œuvre d'un tissu sec**

L'épaisseur de la couche d'encollage déposée sur le support peut être contrôlée au moyen d'une jauge d'épaisseur pour produit visqueux.

Vérifier le sens de pose du tissu.

Après marouflage au rouleau sec, la résine doit ressuer légèrement au travers du tissu (état poisseux).

La couche de fermeture écrasée à la spatule lisse doit avoir un aspect uniforme.

Dans les conditions limites d'application, un échantillon réalisé sur une plaque démoulante peut être conservé dans les conditions du site pour vérifier les caractéristiques du composite après durcissement (éprouvettes de contrôle).

### **Contrôle après exécution du renfort**

Mesure de la dureté shore D de la résine à 48 heures et à 7 jours pour juger de l'étude de réticulation du système mis en place.

Un contrôle sonique sera effectué par de légers tapotements au moyen d'un maillet en bois ou en plastique. Les zones sonnantes creux seront repérées par cerclage au crayon indélébile.

### **Indicateur de présence**

Vérifier l'existence d'un indicateur signalant la présence d'un renfort.

## ***4.3 Contrôle extérieur***

### ***4.3.1 Surveillance de la mise en œuvre***

Ce type de réparations étant difficilement contrôlable par des méthodes non-destructives, il est nécessaire de prévoir une surveillance spécifique des travaux.

Cette surveillance ne doit pas remplacer les actions d'Assurance de la Qualité réalisées par l'Entreprise, ni les levées de point d'arrêt du Plan de Qualité. Elle peut naturellement aider au suivi de ce Plan de Qualité.

### **Avant le début du chantier**

#### ***Qualification du personnel***

Il convient d'avoir la liste nominative des intervenants, vérifier qu'ils possèdent l'habilitation technique requise.

#### ***Procédures***

Elles doivent être vues au niveau du Marché – s'assurer que les intervenants en connaissent le contenu.

### ***Plan de réparation, zones témoins et éprouvettes de suivi***

Vérifier que des plans de zones à renforcer ont été établis, que des zones témoins sont prévues pour essais de convenance et que des supports d'éprouvettes sont disponibles pour des essais de contrôle (cf. chapitre 1).

### ***Produits***

S'assurer que les produits sont livrés à temps et que les aires de stockage sont prévues.

### **Début du chantier**

#### ***Produits***

Ils doivent être commandés en quantité suffisante par rapport aux prévisions d'exécution. Les volumes individuels de conditionnement doivent être compatibles avec l'exécution (spectrographie infrarouge et identification par lot doivent être à disposition). L'étiquetage et le stockage sur site doivent être conformes aux recommandations du chapitre 3.

#### ***Conditions d'ambiance et d'environnement***

Vérifier la conformité et la maîtrise des conditions de température et d'humidité

#### ***Conditions d'accès à la zone à réparer et vérifier***

##### *Préparation des surfaces*

- essai de cohésion superficielle,
- reconstitution d'un profil uniforme et traitement des singularités,
- contrôle de l'humidité du support,
- s'assurer que toutes les préparations des supports soient terminées et dépoussiérées avant application du renfort,
- prévoir un point d'arrêt pour vérification de l'état de surface des zones à réparer.

##### *Contrôle des produits*

- vérifier que les valeurs d'identification rapide sont à l'intérieur des fourchettes annoncées,
- effectuer un prélèvement conservatoire.

##### *Contrôle des conditions d'ambiance (température, humidité de l'air ambiant et du support)*

Contrôle de la préparation des résines (contrôle du non-dépassement de la DPU et des fiches de préparation)

##### *Contrôle de la réalisation du renfort*

- respect du temps de séchage des résines,
- respect des procédures d'exécution du renfort,
- contrôles des quantités consommées,
- respect des procédures d'arrêt,
- réalisation d'éprouvettes de suivi.

##### *Application de la finition éventuelle*

##### *Contrôle en fin de chantier*

- aspect visuel,
- essais liés à la réception des travaux (dureté Shore D en particulier),
- établissement de fiches de constat.

#### **4.4 Maintenance et suivi de vieillissement**

La maintenance doit faire l'objet d'une procédure de suivi de vieillissement. Des contrôles périodiques doivent être programmés afin de s'assurer de la capacité du renforcement à assurer sa fonction :

- contrôle visuel,
- essais d'adhérence sur les zones témoins,
- réalisation en laboratoire d'essais spécifiques sur les éprouvettes confectionnées lors de la réalisation des travaux afin de vérifier les caractéristiques (cf. chapitre 1).

La périodicité de ces contrôles est à définir en fonction du type et de l'environnement de l'ouvrage. Les défauts recherchés sont de type décollement, blessure, etc

##### **Documents à établir :**

- *Fiche de relevé de défauts*
- *En cas de non respect des critères d'admissibilité, méthode de réparation*
- *Dossier de synthèse des contrôles et essais réalisés*

##### **Éprouvettes de suivi de vieillissement**

Une série d'éprouvettes est réalisée en fonction de la nature de l'ouvrage et de la taille de la réparation. La série d'éprouvettes peut être constituée :

- d'éprouvettes sur support en béton revêtu du même revêtement que celui mis en œuvre,
- d'éprouvettes sans support comportant uniquement le système de renforcement,

Les dimensions dépendent des essais à réaliser ; les dimensions suivantes sont recommandées :

- dalles en béton de 600 mm x 600 mm x 50 mm,
- les éprouvettes de système de renforcement sont réalisées sur des surfaces planes et rigides (plaques de PVC de 10 mm enduites de produit de démoulage compatible) de 600 mm x 600 mm,

Les supports d'éprouvettes béton sont soumis à une projection d'abrasifs de façon à obtenir un état de surface aussi proche que possible de celui réalisé sur l'ouvrage à réparer.

Il est recommandé d'effectuer cette opération simultanément à la préparation de la zone à traiter.

Le degré d'humidité de la plaque est vérifié comme pour le béton de la zone à traiter.

Les dalles support d'éprouvettes sont revêtues simultanément à la réalisation du renforcement de la structure et doivent comporter le système complet.

Le repérage des plaques est réalisé au marqueur indélébile.

Un pré-découpage est également réalisé à la scie diamant pour les éprouvettes béton.

Les différentes éprouvettes sont entreposées à proximité de l'ouvrage.

## SYNTHÈSE DE LA CONTRIBUTION

Dans le premier chapitre, nous avons cherché à recenser les normes et procédures d'essais reconnues au plan expérimental et exploitées par le secteur professionnel relevant des matériaux et des structures composites. Le degré d'applicabilité de ces méthodes dans le cadre des travaux de réparation de renforcement, de protection des ouvrages BA, BP du génie civil a été le principal point discuté en commission. Il est évident que les normes et les procédures cités en référence sont susceptibles d'évoluer à l'initiative du secteur professionnel concerné (composites, plasturgie, textile technique) et, dans cette éventualité, les méthodes les plus récentes doivent être retenues.

Dans le cas où il n'existe pas de procédures normalisées reconnues pour générer les jeux de données nécessaires au calcul et au dimensionnement des réparations, notamment dans le cas de la caractérisation de l'interface composite-béton, une méthode expérimentale rédigée suivant un protocole "pré-normatif", est proposée.

Après un bilan bibliographique rigoureux, en prenant en considération les importantes contributions de thèses soutenues récemment sur le sujet, le groupe de travail a sélectionné un essai de traction-cisaillement qui paraît réaliste vis-à-vis des effets d'échelles propres au matériau béton et de la prise en compte des conditions de mise en œuvre particulière au génie civil. Il faut souligner que cette démarche permet plus particulièrement d'évaluer les contraintes critiques en extrémité des plaques composites, de définir les lois de comportement et les contraintes admissibles du joint de colle et de vérifier la performance technologique des matériaux composites mis en œuvre ainsi que l'influence de leurs conditions d'applications.

Le second chapitre propose des méthodes de calcul et de dimensionnement s'inscrivant en parfaite continuité avec les codes et les règlements en vigueur.

A partir des mêmes hypothèses et des données existantes dans l'Eurocode 2 complétées par les propositions établies au chapitre I, nous explicitons la démarche à suivre pour effectuer un dimensionnement suivant les règles de l'ELU et de l'ELS. Dans un souci de sécurité, pour tenir compte d'un certain nombre de points encore mal identifiés, en complément de la proposition d'un certain nombre de coefficients de pondération portant sur les actions, sollicitations et caractéristiques des matériaux, (pour tenir compte de conditions de mise en œuvre et de réalisation de chantier parfois mal connues), nous proposons d'effectuer des vérifications complémentaires visant à s'assurer que les armatures passives n'atteindront jamais leur limite de plastification. Dans ce cas, le moment ultime de la poutre, considérant le moment repris par les aciers au seuil la plastification et sans prendre en considération les efforts repris par les composites, devra être inférieur ou égal au moment des forces extérieures non pondérées ou pondérées suivant des conditions de type accidentelles. Il est possible de penser que ces expressions seront susceptibles d'évoluer en fonction de résultats acquis aussi bien au plan expérimental que numérique dans le cadre de futurs programmes de recherche visant à évaluer la fiabilité et le durabilité des ouvrages réparés. Dans l'attente de ces informations complémentaires (fatigue, fatigue couplée avec conditions d'environnements variables), le critère de mise en sécurité de l'ouvrage réparé vise à éviter la plastification des aciers.

Cette remarque est tout aussi valable pour la justification des calculs des contraintes tangentielles dans la mesure où les travaux du groupe de travail ont clairement mis en évidence la convergence des différentes approches au plan international (réglementation Japonaise, Canadienne, Etats Unis...).

Nous avons abordé la formulation de critères de rupture spécifiques applicables aux poutres renforcées. Les différentes expressions proposées s'appuient sur des résultats de recherches récemment publiés. Il faut attirer l'attention des ingénieurs sur la nécessité de prendre en compte des critères de ruptures de type « critères de plasticité-interactifs » tels que ceux couramment appliqués dans le cas des structures composites (critères de TSAI-WU). En ce sens, l'identification expérimentale de la surface limite (contrainte normale – contrainte tangentielle) des colles ou des interfaces est à prendre en considération.

Dans la mesure où les premiers retours d'expérience sur des ouvrages réparés et instrumentés ont confirmé que les niveaux de contrainte en service dans les plaques composites sont très faibles, cette remarque est secondaire. Toutefois, il est possible de penser que la connaissance plus approfondie de la fiabilité et de la durabilité du procédé constructif aura tendance à mieux exploiter les propriétés des composites et dans ce cas, les critères de rupture en contrainte maximum ne seront plus adaptés.

La nouvelle édition des recommandations aborde les règles de dimensionnement du renforcement vis-à-vis du poinçonnement des dalles et du confinement des poteaux et colonnes en compression simple. Nous souhaitons attirer l'attention des potentiels utilisateurs sur l'importance des dispositions constructives à respecter pour assurer l'efficacité de ces procédés et sur l'importance des expertises préalables des éléments structuraux à renforcer.

Le chapitre III revêt un caractère plus technologique mais d'une très grande importance pour préciser les conditions de mise en œuvre et de contrôle *in situ*. Il vise à avertir le potentiel utilisateur des conditions à respecter pour assurer un renforcement de qualité, pour juger de la reproductibilité et de la traçabilité des composants et des applications. Il met en garde les potentiels utilisateurs vis-à-vis des conditions d'hygiène à respecter lors de l'utilisation de ces nouveaux matériaux.

Tout comme pour les chapitres précédents, les points abordés aussi bien au niveau de la transformation des produits que de la qualité de l'exécution devront faire l'objet d'actions et de travaux complémentaires. En ce sens, il est possible de recommander la réalisation d'ouvrages expérimentaux dont le suivi rigoureux serait très riche d'enseignements.

## **AXES DE RECHERCHE A SOUTENIR**

Les travaux du groupe de travail ont mis en évidence la nécessité d'approfondir deux points en relation d'une part avec l'évaluation des propriétés du substrat (chapitre I et II) et d'autre part avec l'analyse du comportement structurel des ouvrages réparés :

- analyse et évaluation des essais de pastillage,
- prévision de l'ouverture et de la distribution des fissures des poutres renforcées.

Par ailleurs, le groupe a déjà engagé un premier bilan des procédés de renforcement vis-à-vis des sollicitations sismiques. Dans la mesure où différents partenaires du groupe de travail sont impliqués dans des programmes de recherche sur ce thème, il paraît impératif de poursuivre la rédaction de recommandations en 2011 sur le sujet.

En dernier lieu, compte tenu des critères spécifiques concernant la sélection, l'évaluation du cycle de vie des matériaux à matrice polymère dans le contexte général du développement durable et du Grenelle de l'Environnement, compte tenu des recommandations de la circulaire REACH sur la toxicité des produits et des composants, nous recommandons fortement le développement d'actions de recherche visant à proposer des solutions alternatives aux matrices époxydes actuelles, à faire évoluer les textiles de renforcement et les conditions d'applications.

En ce sens, l'utilisation de matrices minérales en substitution aux matrices polymères mérite d'être validée et encouragée.



Réparation et renforcement des structures en béton au moyen  
des matériaux composites

## ANNEXES

## ANNEXE 1: LEXIQUE - GLOSSAIRE

**Chaîne** : nappe de fils ou de filés disposés dans le sens longitudinal d'une étoffe : les fils de chaîne.

**Densité de réticulation** : densité du réseau des nœuds de réticulation. Elle caractérise la cohésion du joint de colle.

**DPU** : temps pendant lequel la résine d'imprégnation peut être manipulée.

**Etat viscoélastique** : phase de comportement où le matériau présente des variations significatives de son module d'élasticité.

**Etat vitreux** : phase de comportement mécanique où le matériau est doué d'un comportement élastique fragile.

**Imprégnation** : faire pénétrer la résine au sein de la structure textile.

**Longueur d'ancrage** : longueur qui permet l'accrochage du composite et qui permet de reprendre les efforts limite de calcul

**Longueur de transfert** : longueur sur laquelle se fait la transmission de l'effort entre le matériau composite et le béton

**Longueur utile (10cm)** : longueur de recouvrement

**Matériau composite** : ensemble hétérogène composé d'une matière enrobante appelée matrice (en résine, métal, céramique...) dans laquelle sont incluses des fibres de renfort (verre, carbone, aramide...).

**Matrice** : polymère (résine) assurant l'enrobage des renforts textiles à des fins de protection et de fiabilité mécanique.

**Matrice thermodurcissable** : polymère qui possède la propriété de durcir au-dessus d'une température donnée et de ne pouvoir reprendre sa forme primitive de manière réversible.

**Moulage au contact** : la résine est déposée sur le tissu par application au pinceau et l'élimination des bulles d'air est réalisée par l'utilisation d'un rouleau ébulleur.

**Nappe** : ensemble des fils de chaîne sur métier à tisser "et métier bonneterie maille jetée élément de nontissé (fils et/ou fibres) destiné à servir de ouate de garnissage.

**Nappe unidirectionnelle** : tissu présentant des renforts dans le sens longitudinal (sens chaîne) avec un fil de liage pour assurer leur positionnement.

**Plat pultrudé** : demi-produit composite profilé suivant la technique de pultrusion.

**Polymérisation** : réaction qui, à partir de molécules de faible masse moléculaire, forme par les liaisons de celles-ci des composés de masse moléculaire élevée.



**Pultrusion** : technique particulière de formage dans laquelle la matière poussée vers la filière est en même temps tirée à la sortie de cette filière.

**Stratification** : disposition de matériaux composite en couches superposées.

**Température de transition vitreuse** : température à laquelle le polymère passe de l'état rigide à l'état caoutchoutique. Elle caractérise les propriétés de l'adhésif.

**Tissu** : surface souple formée par l'entrecroisement perpendiculaire de deux ensembles de fils et/ou filés (chaîne et trame), et réalisée sur machine appelée métier à tisser ou machine à tisser.

**Trame** : en tissage, ensemble des fils perpendiculaires à la chaîne pour constituer un tissu.



Réparation et renforcement des structures en béton au moyen  
des matériaux composites

## **ANNEXE 2 : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES DIFFÉRENTS PRODUITS INDUSTRIELS - NOTION DE "KIT"**

**FICHE TECHNIQUE FREYSSINET  
Procédé FOREVA TFC**

**NOM DU PROCÉDÉ :** FOREVA TFC « dénomination abrégée : TFC® »

**DOMAINE D'APPLICATION :** Acier, Pierre, Bois (massif, aggloméré ou lamellé), béton, stratifiés à base de résine thermodurcissable, ou TFC sur lui-même.  
Dispose d'un Avis Technique CSTB

**FIBRES DE RENFORCEMENT**

**Nature** :  Verre       Aramide       Carbone

**Type** : Haute résistance

**Nombre de filaments** : 12 K

**Référence** : } TORAYCA

**Provenance** : } SOFICAR

**RÉSINES**

**Composite (confection)**

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxyde	FOREVA EPX TFC A/ TFC B	PPC

**Interfaces (adhésif)** Béton – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Sans objet		

Composite – composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Sans objet		

Composite – couches de finition

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Sans objet		

**Spécifications (cf. chapitre I pour leur détermination)**

Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
température limite de fonctionnement (°C)		80°C cisaillement 2,7 Mpa	
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> <li>• durcisseur</li> <li>• résine</li> </ul>		1,32 / 1,36 1,00 / 1,04	
DPU (durée pratique d'utilisation) (1kg) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5°C</li> <li>• 10°C</li> <li>• 15°C</li> <li>• 20°C</li> <li>• 25°C</li> <li>• 30°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>		8h 4h30 2h30 1h20 50min 40min 30-35min	
Température de mise en œuvre		5°C à 45°C	Sans précaution particulière
Viscosité		20 000 MPa.s à 20°C	
Dureté shore D ou Barcoll <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 heures</li> <li>• 2 jours</li> <li>• 7 jours</li> </ul>		58 79 80	
Résistance à la traction Allongement à la rupture		27 ± 3 MPa 1.7 ± 0,1 MPa	
Résistance au cisaillement Résistance à la compression		56,3 ± 0,7 MPa 89 ± 5 MPa	
Résistance à la flexion		Non mesurée	
Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E compression</li> </ul>		2300 ± 120 MPa 3400 ± 400 MPa	
Adhérence <ul style="list-style-type: none"> <li>• sur béton sablé sec</li> <li>• sur béton sable humide</li> </ul>		2,5 MPa rupture béton 2,0 MPa rupture béton	Sur béton B40

### Conditionnement / Stockage

Deux composants prédosés conditionnés en jeux de 5 kg prêts à l'emploi. Chaque emballage précise la date limite d'utilisation dans des conditions de stockage habituelles (emballages non ouverts entre 5 et 30°C sous abri)

### COUCHES DE FINITION

Voir mise en œuvre.

### TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

#### Pultrudé

OUI  NON

UD (unidirectionnel) Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel) Grammage :  
 Orientation :

Autres renseignements :

#### Tissu sec

OUI  NON Satin de 4 conforme à la norme ISO 72

UD (unidirectionnel) Epaisseur : 0.48 mm  
 BD (bidirectionnel) Grammage : 500 grammes / m<sup>2</sup>  
 Orientation : orthonormé : 70/30

Autres renseignements :

#### Pré-imprégné

OUI  NON

UD (unidirectionnel) Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel) Grammage :  
 Orientation :

Autres renseignements :

#### Conditionnement

Rouleaux : Diamètre : longueur inférieure ou égale à 50 mètres

Largeur : 75 – 150 – 200 – 300 mm

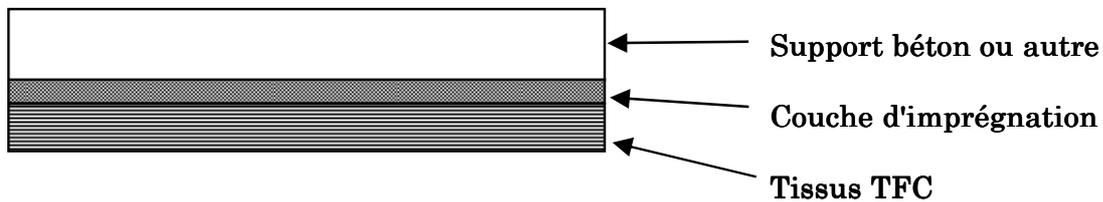
Autres :

### Stockage

Le stockage du tissu doit être fait à l'abri de l'humidité dans un local aéré.  
Le tissu stocké correctement n'a pas de limite d'utilisation.

### COMPOSITE RÉALISÉ *IN SITU* (cf. chapitre I)

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas (pas de limite de couches)  
(le haut correspond à la partie à renforcer)



### Caractéristiques (valeurs minimales garanties)

Désignation	Norme	Caractéristiques
Module d'élasticité - traction		105 GPa
Contrainte à la rupture – traction		> 1700 MPa
Allongement à la rupture – traction		≥ 1,5 %
Résistance interlaminaire au cisaillement		> 4,3Mpa ELU
Résistance au cisaillement par couche		> 4,3Mpa ELU

**Nombre de couches** mini : 1  
maxi : pas de limite si le support peut entraîner le renfort

**Limites composite** Température : 80°C temporaire 60°C permanent  
Humidité du support : insensible après durcissement  
Croisement : sans limite  
Rayon de courbure mini : suivant la force de traction  
Autres :

### Spécificités du produit

Avantages : Pas d'interface collage autre que support / composite.

Inconvénients :

Application sur ouvrages en service : oui mais avec limite de déformation pendant le durcissement de la résine

## FICHE TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE DU PROCÉDÉ TFC®

La préparation du support ayant été réalisée et réceptionnée, la pose du TFC® s'effectue comme suit :

### CAS GÉNÉRAL

#### 1. Conditions d'application

- Conditions climatiques

La pose du TFC® doit être réalisée sur un support dont la température est supérieure à 5°C, et à température ambiante comprise entre 5°C et 45°C. Si le support est chauffé, on devra assurer le maintien de la température pendant la durée de polymérisation du composite.

Le taux d'hygrométrie n'est pas un facteur rédhibitoire. On s'assure qu'il n'y a pas de ruissellement d'eau sur le support (respecter la règle de +3°C sur le support par rapport à la température du point de rosée de l'air).

- Conditions de réalisation

Le projet a fait l'objet d'une étude, le personnel de chantier dispose d'un plan de pose et de repérage.

#### 2. Application du TFC®

Le TFC® est un tissu sec appliqué sur une couche de résine humide. L'application est faite directement sur le support.

- Mélange de la résine :

⇒ La résine époxy-bi-composant est livrée en kits prédosés, elle doit être mélangée dans son intégralité. Le mélange doit être effectué de façon mécanique en utilisant un fouet hélicoïdal monté sur une perceuse. Les deux composants sont de teintes différentes. Le mélange est prêt quand la teinte du produit mélangé est uniforme.

- Application de la première couche de résine

⇒ On applique la première couche de résine époxy (dite couche de collage) avec des moyens permettant de "masser" le support pour faire pénétrer la résine au mieux dans

les anfractuosités du support, et assurer ainsi une bonne imprégnation de surface. La couche de collage est appliquée à raison de  $700 \text{ g/m}^2 \pm 50 \text{ gr}$  au moyen d'un rouleau à poils ras. Pour des surfaces importantes, on peut utiliser des rouleaux auto-alimentés type Airless par exemple.

- Application des bandes de tissu de carbone

⇒ Les tissus sont préalablement découpés en lés aux dimensions indiquées par le plan de pose. Les tissus sont livrés en largeurs standards, les découpes sont toujours réalisées dans le sens de la largeur. Les coupes longitudinales dans les tissus ne sont pas admises car sans fil de bordure, le tissu se défait et rend le collage difficile. Le tissu doit toujours être appliqué sur une couche de résine humide. La pose du tissu sur la couche humide se fait en partant d'une extrémité vers l'autre par placage du revers de la main sur la résine de collage à l'avancement. Pendant cette opération de pose, on vérifie à l'avancement le parallélisme d'un des bords extérieurs du lé par rapport à une trajectoire tracée sur le support, ou par rapport au lé précédant dans le cas de bandes juxtaposées.

Le lé de tissu doit être posé sans pli et sans étirement excessif sur un support préalablement "reprofilé" si nécessaire. Après la pose, le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage permettant l'imprégnation de la résine dans les fibres de carbone et l'élimination des bulles d'air éventuelles. Le marouflage est réalisé au moyen d'un rouleau en élastomère souple ou d'un rouleau de peintre à poils ras muni de son tube de protection en polyéthylène.

Après l'opération de marouflage, le tissu doit avoir un léger pisseux au toucher bien que la présence de résine ne soit pas perceptible en tous points.

- Application de la couche de résine de fermeture

La deuxième couche de résine (dite couche de fermeture) est destinée à donner l'apport de matière epoxydique permettant d'achever l'imprégnation du tissu. Cette deuxième couche est appliquée immédiatement après la pose du tissu. En aucun cas, cette couche ne peut être appliquée après polymérisation de la première couche. L'application de la couche de fermeture est faite au moyen d'un couteau à enduire passé dans le sens des fibres de carbone sans excès de pression. La quantité mise en œuvre de cette couche est de  $700 \text{ g/m}^2 \pm 50 \text{ gr}$ .

La pose de cette couche n'est jamais strictement uniforme.

On peut, après durcissement, constater en surface du TFC® des zones plus ou moins brillantes dues à des surépaisseurs de résine ; ces défauts d'aspect n'altèrent pas la résistance des renforcements.

## Dispositions constructives

### 1. Recouvrements

On appelle recouvrement la longueur nécessaire de tissu superposé pour assurer la continuité d'une bande interrompue et prolongée par une autre.

Les recouvrements ne s'appliquent qu'au sens longitudinal du tissu de renforcement.

C'est souvent le cas quand il est nécessaire de déplacer des échafaudages ou de travailler par zones pour des raisons d'exploitation dans les locaux en service.

Les recouvrements peuvent alors être réalisés soit sur une couche de résine humide ou sur une couche de résine durcie :

- sur une couche de résine humide : le tissu en recouvrement peut être appliqué directement sur la couche de finition des lés déjà posés.
- sur TFC® durci : la zone de recouvrement doit être dépolie au moyen d'un papier abrasif et nettoyée au moyen d'un chiffon imbibé de MEC, avant d'appliquer une couche de collage sur laquelle sera posé le tissu.

Le recouvrement doit avoir une longueur minimum de 10 cm quelle que soit la largeur du tissu.

### *2. Couches de TFC® superposées*

Il est possible de superposer des couches de TFC® pour réduire la contrainte de travail dans le matériau de renfort.

La superposition de couches peut se faire sur couche de résine humide pendant la pose ou après durcissement du composite.

Les procédés de pose sont alors identiques, dans les deux cas, aux procédures de recouvrement.

Le nombre maximum de couches superposées n'est limité que par la capacité d'adhérence au support.

### *3. Renforcement à l'effort tranchant*

L'orientation des lignes de force définit un axe de rupture incliné.

La longueur de collage de part et d'autre de cet axe devra être au moins égale à 10 cm au minimum et sur toute la hauteur de la poutre.

Le renforcement de cette zone peut être réalisé par des bandes posées bord à bord ou espacées suivant l'importance des efforts à reprendre.

## **ÉLÉMENTS COMPLÉMENTAIRES AU KIT TFC® PROTECTIONS MÉCANIQUES**

Le TFC® peut être en phase finale revêtu de divers systèmes pour des raisons d'esthétique et de protection.

## **PEINTURES DÉCORATIVES**

Le TFC® a une matrice de base époxydique. Il peut être revêtu une fois sa polymérisation terminée :

- de tous systèmes de peinture epoxy compatibles avec un support epoxy,
- de tous systèmes de peinture polyuréthane compatibles avec un support époxy.

Dans le cas de revêtements pelliculaires de type LHM (Liant Hydraulique Modifié), l'état de surface de la couche fermeture du TFC® doit être traité de façon spécifique au moment de la pose.

Il faut, pour assurer l'adhérence d'un tel système, avoir une surface d'adhérence de base minérale. Pour créer ce support minéral, on incorpore, sur la superficie, un sable sec de calibre 0,5 – 1,5 jeté à la volée sur la résine encore humide.

En cas de chocs et d'abrasion, une protection est requise. Elle est définie par les pièces écrites du marché et appliquée sur une passe de résine sablée.

## **PROTECTION AU FEU**

Le TFC® est classé M1 sur support M0.

La stabilité au feu de la structure renforcée peut être justifiée selon le DTU Feu Béton en faisant un calcul à l'ELU avec des charges non pondérées et en prenant en compte seulement les aciers existants.

Si cette justification n'est pas satisfaite, la structure doit être protégée par un produit isolant pour que sa température permette la justification de stabilité au temps impartie avec les aciers existants.

Si le complément d'armature collé s'avère indispensable, le produit isolant devra être dimensionné pour que la température au temps impartie ne dépasse pas 80°C sur le composite.

La justification de la satisfaction aux exigences des règlements de sécurité est faite à partir de performances consignées dans les procès verbaux établis par les laboratoires agréés par le Ministère de l'Intérieur : hors cahier des charges.

**FICHE TECHNIQUE FREYSSINET**  
**Procédé lamelles carbone LFC**

**NOM DU PROCÉDÉ :** FOREVA LFC

**DOMAINE D'APPLICATION :** Acier, Pierre, Bois (massif, aggloméré ou lamellé), béton,  
Composite ou pultrudé à base de résine thermodurcissable

**FIBRES DE RENFORCEMENT**

**Nature** :  Verre  Aramide  Carbone

**Type** : Haute résistance

**Nombre de filaments** : 12 K

**Référence** : } TORAYCA  
**Provenance** : }

**RÉSINES (résine de collage)**

**Interfaces** (adhésif) Support – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxyde	Foreva Epx SC 980 (résine et durcisseur)	PPC

Composite – composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Sans objet		

Composite – couches de finition

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Sans objet		

**Spécifications (cf. chapitre I pour leur détermination)**

Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> <li>• durcisseur</li> <li>• résine</li> <li>• Mélange</li> </ul>		1,52 / 1,62 1,39 / 1,49 1.45-1.55	
DVP (durée de vie en pot)		2h30 à 23°C	
Température de mise en œuvre		Entre 5 et 45°C	Sans précaution particulière
Viscosité		Pâte thixotrope	
Dureté shore D		Max. 83. Durcissement complet à 23°C : 48h	
Résistance à la traction Allongement à la rupture		29.5 ± 1.2 MPa 0.65 ± 0,1 MPa	
Résistance à la compression		83 ± 1.5 MPa	
Résistance à la flexion		n m	
Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E (0,2 %) compression</li> </ul>		4940 ± 170 MPa 4200 ± 150 MPa	
Adhérence <ul style="list-style-type: none"> <li>• sur béton sablé sec</li> <li>• sur béton sable humide</li> </ul>		> 2,5MPa > 2 MPa	Sur béton B40

**Conditionnement / Stockage**

Deux composants prédosés conditionnés en cartouches bi-composant de 400ml ou kits de 5 kg prêts à l'emploi. Chaque emballage précise la date limite d'utilisation dans des conditions de stockage habituelles (emballages non ouverts entre 5 et 30°C sous abri)

**TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ**

**Pultrudé**

OUI  NON

- UD (unidirectionnel)      Epaisseur : 1.2 mm  
 BD (bidirectionnel)      Grammage :  
Orientation : 0° (fils parallèles)
- Autres renseignements :

**Tissu sec**

- OUI       NON
- UD (unidirectionnel)      Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel)      Grammage :  
Orientation :
- Autres renseignements :

**Pré-imprégné**

- OUI       NON
- UD (unidirectionnel)      Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel)      Grammage :  
Orientation :
- Autres renseignements :

**Conditionnement**

Rouleaux :      Diamètre : longueur inférieure ou égale à 50 mètres  
Largeur : 50 - 80 – 100 ou 150 mm  
Autres :

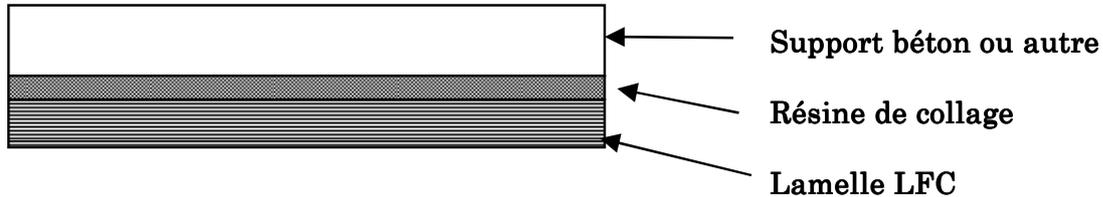
**Stockage**

Lamelles : pas de conditions ni délai particulier. Eviter les chocs et les torsions

Résine de collage : Conservés dans leurs emballages d'origine avant ouverture, à l'abri de l'humidité et à une température comprise entre +15°C et +35°C, la résine et le durcisseur peuvent être stockés pendant 4 ans.

## COMPLEXE RÉALISÉ (cf. chapitre I)

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas (le haut correspond à la partie à renforcer)



### Caractéristiques (valeurs minimales garanties)

Désignation	Norme	Caractéristiques
Module d'élasticité - traction	EN 2561	160 GPa
Contrainte à la rupture – traction		> 3000 MPa
Allongement à la rupture – traction		≥ 1,7 %
Contrainte de cohésion dans l'épaisseur		> 35 MPa
Coefficient de dilatation thermique		1.3 μm/m/°C

**Nombre de lamelles** mini : 1  
maxi : pas de limite si le support peut entraîner le renfort

**Limites du composite** Température : 80°C temporaire 60°C permanent  
Humidité du support : insensible après durcissement  
Rayon de courbure mini : suivant la force de traction  
Autres :

### Spécificités du produit

Avantages :  
Haut module de traction  
Haute résistance en traction  
Excellente tenue aux intempéries et agressions extérieures  
Inconvénients : exige une planéité du support conforme aux règles de l'art des tôles collées  
Application sur ouvrages en service : oui mais avec limite de déformation pendant le durcissement de la résine

Autres :

## **FICHE TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE DU PROCÉDÉ LFC®**

### **Tolérances des défauts du support**

Les lamelles Foreva® LFC 50, 80, 100 et 150 sont des produits rigides; les tolérances de planéité du support sont sensiblement les mêmes que pour la pose des tôles d'acier collées.

### **Planéité admissible du support :**

- Creux :
  - > Flèche  $\leq 5$  mm sous la règle de 2 mètres ou
  - > Flèche  $\leq 2$  mm sous la règle de 0,20 mètres
- Bosse :  $\leq 1$  mm
- Bullage :  $\varnothing \leq 2$  mm ou profondeur  $\leq 4$  mm et  $\leq 10\%$  surface
- Surface rugueuse : profondeur  $\leq 1,5$  mm

### **Traitement des défauts du support :**

- Creux :  $\rightarrow$  ragréage au mortier de résine après préparation du support (recommandations du Fascicule N°6 du STRESS).
- Bosse :  $\rightarrow$  ponçage, rabotage, ou bouchardage.
- Bullages :  $\rightarrow$  profilage pâte époxyde avant pose.
- Surface rugueuse :  $\rightarrow$  surfacage pâte époxyde.

### **Abrégé de spécification de mise en oeuvre**

Ne pas appliquer sans précaution pour des températures  $< 5^{\circ}\text{C}$  ou  $> 35^{\circ}\text{C}$

- Traçage des zones de renfort ;
- Préparation de la surface (sablage, ponçage ou rabotage,...) ;
- Dépoussiérage soigné ;
- Essais d'aptitude du support par essais d'arrachement direct. La contrainte mesurée doit être supérieure ou égale à 2 MPa (le cas échéant des dispositions spéciales devront être prises) ;
- Découpe à longueur des lamelles Foreva® LFC 50, 80, 100 et 150 ; (disque pour métaux) ;
- Mélange de la résine et du durcisseur Foreva® Epx SC 980 ;
- Ponçage et dégraissage au MEK de la face à encoller de la lamelle ;
- Application d'une couche d'adhésif Foreva® Epx SC 980 (1 mm) sur le béton préparé ;
- Application d'une couche d'adhésif Foreva® Epx SC 980 (1 mm) sur la lamelle préparée ;
- Pose de la lamelle et alignement ;
- Marouflage de la lamelle avec un rouleau rigide (le marouflage a pour objectif d'écraser le film de colle pour chasser l'excédent et éliminer les bulles d'air occluses sur l'interface de collage).

**FICHE TECHNIQUE VINCI**  
**Procédé ROCC+®**

**NOM DU PROCÉDÉ :** ROCC+®

**DOMAINE D'APPLICATION :** Renforcement de structures par tissus composites collés.

**FIBRES DE RENFORCEMENT :**

- Nature** :  Carbone
- Type** : Haute résistance
- Nombre de filaments** : 24 K
- Référence** : UD 600B-C24K
- Provenance** : CHOMARAT Composites

**RÉSINES**

**Composite** (confection) :

Type	Référence	Provenance
Epoxyde	CAB C 07 <ul style="list-style-type: none"> <li>Résine C 07 : XB 3517</li> <li>Durcisseur C 07 : XB 3419</li> </ul>	CAB-APLITEC

**Interfaces** (adhésif) : Même résine pour l'ensemble des interfaces

- Béton – Composite
- Composite – composite
- Composite – couches de finition

### Spécifications (notice technique CAB-APLITEC)

Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
TG : température de transition vitreuse		54.5°C	
Densité : <ul style="list-style-type: none"> <li>Résine C 07</li> <li>Durcisseur C 07</li> </ul>		1,17 g/cm <sup>3</sup> 1,01 g/cm <sup>3</sup>	
DPU (durée pratique d'utilisation)		2h30	
Température de mise en œuvre		10°C – 35°C	
Viscosité : <ul style="list-style-type: none"> <li>Résine C 07</li> <li>Durcisseur C 07</li> </ul>		15000 mPa.s 7000 mPa.s	
Résistance : <ul style="list-style-type: none"> <li>à la flexion</li> <li>à la traction</li> <li>au cisaillement</li> </ul>		78 MPa 56 MPa 14 MPa	
Module d'élasticité : <ul style="list-style-type: none"> <li>en flexion</li> <li>en traction</li> </ul>		3325 MPa 3218 MPa	

#### Conditionnement / Stockage :

Les deux composants de la résine se présentent sous la forme d'un kit prédosé (résine+durcisseur). Deux formats de kits sont disponibles « 2,5 + 1 kg » et « 5 + 2 kg ». Chaque emballage précise la date limite d'utilisation dans les conditions de stockage indiquées par le fournisseur (Emballages correctement fermés dans un local sec entre 2 et 40°C)

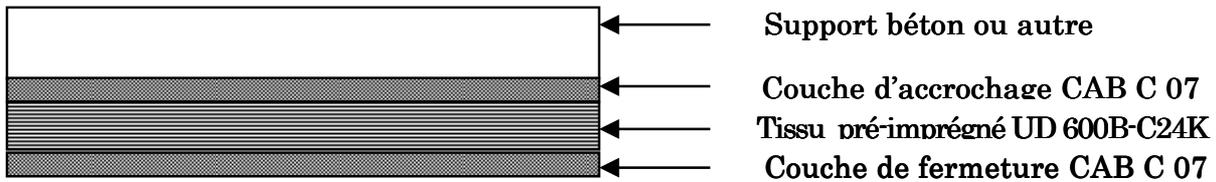
### TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

			ROCC+®
<b>Pultrudé</b>	<input type="checkbox"/> OUI	<input checked="" type="checkbox"/> NON	
	UD : épaisseur : BD : grammage :		
<b>Tissu sec</b>	<input checked="" type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON	
	UD : grammage : épaisseur tissu sec : BD : grammage :		622 g/m <sup>2</sup> 0,8 mm
Autres renseignements			
<b>Pré-imprégné</b>	<input type="checkbox"/> OUI	<input checked="" type="checkbox"/> NON	
<b>Conditionnement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rouleaux :</li> <li>Autres :</li> </ul>		Longueur = 100 m Largeur = 15 cm 30 cm 58 cm

**Stockage :** Pendant 2 ans à l'abri avec une température < 50°C et une humidité relative < 85%. Au-delà de ces 2 années, les propriétés mécaniques seront vérifiées.

### COMPOSITE REALISÉ IN SITU

**Croquis :** décrivant les différentes couches de haut en bas (le haut correspond à la partie à renforcer)



### Caractéristiques

	ROCC+®
Module d'élasticité	80 GPa
Résistance à la traction	722 MPa
Allongement à la rupture	9 ‰
Epaisseur du composite	1 mm
Nombre de couches : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mini</li> <li>• Maxi</li> </ul>	1 Limitation en fonction de la résistance au cisaillement de l'interface
Limites : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température</li> <li>• Humidité</li> <li>• Croisement</li> <li>• Rayon de courbure mini</li> <li>• Autres</li> </ul>	45°C en service continu et 60°C en situation accidentelle Insensible après durcissement Sans limite Arêtes chauffreïnées de 1 cm sur 1 cm minimum

### Spécificités du produit

- Avantages :

Un renforcement adapté à toutes les formes de structures, même complexes.

Une imprégnation maîtrisée du tissu.

Insensible à la corrosion et à l'humidité.

Grande résistance à la fatigue.

Encombrement quasi-nul.

Simplicité de mise en œuvre.

- Inconvénients :

- Application sur ouvrage en service : Oui dans la limite de la déformation de la résine pendant le durcissement.

**FICHE TECHNIQUE SIKA**  
**Procédé SikaWrap®**

**NOM DU PROCÉDÉ :** SikaWrap®

PRFC : Tissu de fibres de carbone **SikaWrap®-230 C/45** associé à la résine **Sikadur®-330**.

Bénéficie d'un Avis Technique CSTB.

**DOMAINE D'APPLICATION :**

Renforcement de structures en béton armé, maçonnerie et bois, soumises à des contraintes de flexion, de cisaillement, de traction, de torsion :

- Augmentation de la capacité portante
- Renfort et frettage de poteaux
- Changement de destination / réaménagement
- Réparation de dommages
- Mesures préventives parasismiques
- Adaptation aux exigences de changements de normes et prescriptions

**FIBRES DE RENFORCEMENT :** Tissu SikaWrap®

**Nature** :  Carbone  
**Type** : Haute Résistance, unidirectionnel  
**Référence** : Tissu SikaWrap®-230 C/45  
**Provenance** : Sika

**PRODUIT DE COLLAGE : résine Sikadur®-330**

Composite (confection) :

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-330	Sika AG

Interfaces (adhésif) :

Béton – Composite :

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-330	Sika AG

Composite – Composite :

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-330	Sika AG

### Spécifications

Le produit Sikadur® 330 est un produit conforme aux exigences de la norme EN 1504-4, en tant que produit de collage structural pour le collage de renforts (conformément à la norme Européenne EN 1504-9, principe 4, méthode 4.3).

Il fait l'objet du marquage CE obligatoire en production depuis le 01 01 2009.

Pour de plus amples détails, consulter la notice technique.



Désignation	Norme	Caractéristiques
Tg : température de transition vitreuse (°C)	ASTM D648  EN 12614	HDT (Heat Deflection Temperature) 36°C après 7 j à 10°C 47°C après 7 jours à 23°C 53°C après 7 jours à 35°C  58°C après 30 jours à 30°C
Masse volumique		1,3 g/l environ
Durée de vie en pot = Pot life	ISO 9514	90 mn à 10°C 30 mn à 35°C
Temps ouvert		60 min à +10°C - 30 min à +35°C
Température de mise en œuvre (support, ambiance, produit)		+10°C min/ +35°C max
Viscosité		10 000 mPas à 10°C 6 000 mPas à 23°C 5 000 mPas à 35°C
Résistance à la traction	DIN 53455	30 MPa
Module d'élasticité en flexion	DIN 53452	3 800 MPa après 7 jours à 23°C
Module d'élasticité en traction	DIN 53455	4 500 MPa après 7 jours à 23°C
Allongement à la rupture	DIN 53455	0,9% après 7 jours à 23°C
Adhérence	EN 24624	> 4 MPa rupture dans le béton

### Conditionnement / Stockage :

Kit de 5 kg.

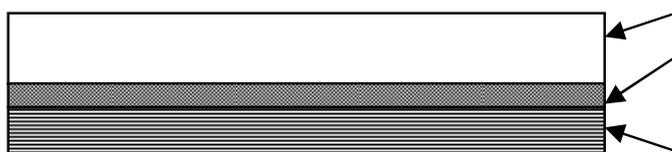
24 mois à partir de la date de fabrication, quand le produit est stocké dans son emballage d'origine intact, non entamé, à l'abri du gel, de l'humidité et des rayons solaires directes, à une température comprise entre +5°C et +25°C.

### TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

		SikaWrap®-230 C/45
<b>Pultrudé</b>	<input type="checkbox"/> OUI   <input checked="" type="checkbox"/> NON	
	UD : épaisseur : BD : grammage :	
<b>Tissu sec</b>	<input checked="" type="checkbox"/> OUI   <input type="checkbox"/> NON	
	Orientation des fibres : 0° - Uni directionnel Poids surfacique épaisseur du tissu Résistance à la traction des fibres Module Elasticité en traction des fibres Allongement à la rupture des fibres	230 g/m <sup>2</sup> 0,13 mm 4300 MPa 234 000 MPa 1,8%
<b>Pré-imprégné</b>	<input type="checkbox"/> OUI   <input checked="" type="checkbox"/> NON	
<b>Conditionnement</b>	Longueur Largeur	Rouleaux de longueur = 50 m Largeurs = 30 et 60 cm

### COMPOSITE REALISÉ IN SITU

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas  
(le haut correspond à la partie à renforcer)



support béton

couche résine Sikadur®-330

Tissu SikaWrap®-230 C/45  
marouflé dans la couche de  
résine Sikadur® 330

### Caractéristiques

	Composite SikaWrap®-230 C/45 + Sikadur®- 330
Module d'Elasticité en traction*	25 kN/ mm <sup>2</sup>
Charge ultime pour une couche*	350 kN/m de largeur

Limites : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température en service</li> <li>• Humidité max du support</li> <li>• Croisement</li> <li>• Rayon de courbure mini</li> </ul>	50°C 4% Possible grâce à la faible épaisseur 20 mm mini
Résistance interlaminaire au cisaillement ASTM D 3165	17 MPa

\* épaisseur du composite pour l'essai = 1 mm

Ces valeurs sont des moyennes, données à titre indicatif à partir d'essais réalisés en laboratoire. Les caractéristiques obtenues lors des tests en traction dépendent du taux d'imprégnation des fibres par la résine, ainsi que de la procédure et des conditions d'essai.

### Paramètres de calcul

Généralement la valeur retenue de l'allongement de calcul est de 0,6%.

Effort repris à 0,6% d'allongement par une couche de composite SikaWrap®-230 C/45 - Sikadur®-330

45 kN / pour une bande de largeur 30 cm

90 kN / pour une bande de largeur 60 cm

### Spécificités du produit

- Avantages :
  - Facile à appliquer sur des surfaces planes ou courbes (colonnes, cheminées, dômes, silos ...)
  - Utilisable pour le renforcement vis-à-vis des efforts de flexion, de cisaillement, de traction, de torsion
  - Insensible à la corrosion
  - Epaisseur faible, même dans le cas d'application de plusieurs couches de tissu
  - Insensible à la corrosion
  - Encombrement quasi-nul.

- Application sur ouvrage en service : Oui

## FICHE TECHNIQUE DE MISE EN OEUVRE DU PROCÉDÉ SikaWrap®-230 C/45

### Qualité du support

Les bétons et mortiers doivent avoir au moins 28 jours.

Le support doit être propre, sec, exempt de toute trace de graisse, d'huile, de rouille, de produit de cure, d'ancien revêtement ou traitement de surface, de parties non ou peu adhérentes, de laitance.

Le support doit être sain et présenter, après préparation, une cohésion superficielle supérieure à 1 MPa.

La planéité de surface doit rentrer dans la tolérance de  $\pm 2$  mm sur une longueur de 30 cm.

Les balèvres de coffrages et saillies ne doivent pas excéder 0,5 mm. Si nécessaire, ragréer à l'aide de Sikadur-41F.

Les fissures d'une largeur supérieure à 0,25 mm doivent être injectées à l'aide de Sikadur-52, suivant les méthodes habituelles d'injection.

Les angles saillants de la structure doivent être arrondis jusqu'à obtenir un rayon d'au moins 20 mm (fonction du type de tissu SikaWrap® utilisé); Ceci peut être fait en utilisant une ponceuse à disque diamanté.

### **Préparation du support**

Les supports en béton et en maçonnerie doivent être préparés mécaniquement par sablage ou par ponçage (au disque diamanté), afin d'éliminer la laitance de ciment, les particules friables non ou peu adhérents, et d'ouvrir la porosité de surface.

Les supports en bois doivent être rabotés, poncés, ou sablés.

Avant l'application du Sikadur®-330, toutes les poussières et autres particules non ou peu adhérentes doivent être complètement éliminées du support de préférence par brossage puis par aspiration mécanique.

Les zones de béton/ maçonnerie faibles doivent être éliminées puis réparées à l'aide de Sikadur®-41F ou un mélange de Sikadur®-30 et de sable de quartz Sikadur®-501 (ratio 1 : 1 max en poids).

### **Méthode d'application**

#### **Préparation:**

Avant l'application, contrôler l'humidité du support, l'humidité relative et le point de rosée.

Couper le tissu SikaWrap® aux dimensions désirées.

#### **Application du Sikadur®-330:**

Appliquer le Sikadur®-330 sur le support préparé à l'aide d'une truelle, d'un rouleau, d'une brosse.

#### **Mise en place du tissu et marouflage :**

Sans attendre, placer et positionner le tissu dans le sens adéquat conformément aux indications fournies par le Bureau d'Etudes.

Maroufler le tissu sur la couche de résine à l'aide du rouleau marouffleur afin que la résine traverse et imprègne uniformément toute la surface du tissu SikaWrap®.

Cette opération se réalise aisément, sans forcer, dans le sens longitudinal des fibres, de façon à évacuer l'air éventuellement emprisonné, sans créer de faux plis, ni déformer le tissu.

Lisser la surface à l'aide d'une large brosse pour homogénéiser la surface du composite ainsi réalisé.

#### **Application de couche supplémentaire de tissu SikaWrap® (en fonction des indications fournies par le Bureau d'Etudes)**

Appliquer une couche de résine Sikadur®-330 (dans un délai de 60 minutes à 23°C après l'application de la couche précédente) sur la couche précédente de tissu encore fraîche et répéter l'opération précédente de marouflage Si ce n'est pas possible, attendre au moins 12 heures avant l'application.

#### **Revêtements de finition:**

Quand un produit à base de ciment doit être appliqué en tant que revêtement de finition, appliquer une couche supplémentaire de résine Sikadur®-330 à raison de 0,5

kg/m<sup>2</sup>, puis saupoudrer du sable de quartz pour renforcer l'adhérence du revêtement hydraulique

Quand un revêtement coloré doit être appliqué, le Sikadur®-330 encore frais doit être égalisé à l'aide d'une brosse.

#### Recouvrement :

Cas de pose dans le sens longitudinal des fibres : le recouvrement du tissu SikaWrap® doit être d'au moins 100 mm.

Cas de la pose bord à bord: la superposition des couches de tissu posées bord à bord n'est pas nécessaire.

#### Notes sur l'application

Le produit doit être utilisé par des professionnels expérimentés, qualifiés, formés.

La résine Sikadur®-330 doit être protégée de la pluie pendant au moins 24 h après l'application.

Veiller à ce que le positionnement du tissu SikaWrap® et le marouflage soit effectué durant le temps ouvert.

Pour des raisons esthétique et/ou de protection (rayons solaires directs, humidité permanente) le tissu SikaWrap® doit être recouvert en extérieur par application de mortier à base de liant hydraulique modifié (Sikatop®-107, ou Sikatop®-121) ou d'un revêtement de protection à base de résine (Sikagard®-680 S Betoncolor, Sikagard®-550 W Elastic ou Sikagard®-675 W Elastocolor).

A basse température ou en présence d'humidité relative élevée, un résidu poisseux peut se former en surface du Sikadur®-330 durci. Si une couche supplémentaire de tissu SikaWrap® ou un revêtement doit être appliqué sur la résine Sikadur®-330 durcie, ce résidu poisseux doit d'abord être enlevé à l'eau (éponge imbibée d'eau) pour permettre une bonne adhérence. Dans tous les cas, cette surface nettoyée doit être sèche avant l'application de la prochaine couche (résine/tissu ou revêtement final).

Pour les applications à basses ou à hautes températures, stocker préalablement les produits pendant au moins 24 h à l'abri du gel, de l'humidité et des rayons solaires directes, à une température ambiante adéquate favorisant le malaxage, l'application, et la durée de vie en pot.

Quand plusieurs couches supplémentaires de tissu SikaWrap® sont appliquées "frais sur frais" veiller à éviter tout mouvement, tout glissement du composite pendant le durcissement du Sikadur®-330.

#### Précautions d'emploi

Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur **Internet [www.sika.fr](http://www.sika.fr)**.

**FICHE TECHNIQUE SIKA**  
**Procédé Sika® CarboDur®**

**NOM DU PROCÉDÉ :** Sika® CarboDur®

Le procédé Sika® CarboDur® bénéficie d'un Avis Technique CSTB.

**DOMAINE D'APPLICATION :** Renforcement ouvrages Béton Armé, Béton Précontraint, Bois, Maçonnerie, construction métallique

**Augmentation de charges**

Augmentation de la capacité portante des poteaux, des poutres, des dalles - augmentation des charges d'exploitation, trafic, changement de destination du local, ...

**Endommagement des éléments de structures**

- Dégradation des matériaux de la structure
- Corrosion ou sectionnement d'armatures
- Chocs
- Incendie
- Charges dynamiques, séismes

**Amélioration des conditions de service**

- Réduction de flèche de planchers ou poutres
- Réduction des contraintes dans les armatures internes
- Diminution de l'ouverture des fissures

**Modification de la structure**

- Création de trémies (voile, dalle, poutre...)
- Elimination de murs, poteaux

**Mise en conformité suite à l'évolution de la réglementation**

- Domaine Parasismique
- Nouveau code de calcul

**Défauts de conception, défauts de calcul**

- Insuffisance de section d'acier interne
- Défaut de positionnement

**FIBRES DE RENFORCEMENT Plat pultrudé - Sika® CarboDur® Lamelle**

**Nature**  Carbone

**Type** Très Haute Résistance

**Référence** Sika® CarboDur® type S ou M

**Provenance** Sika

**PRODUIT DE COLLAGE :** Résine Sikadur®-30

**Interfaces**

Béton – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-30	Sika AG

Composite – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-30	Sika AG

Spécifications (cf. chapitre I pour leur détermination).

Le produit Sikadur® 30 est un produit conforme aux exigences de la norme EN 1504-4, en tant que produit de collage structural pour le collage de renforts (conformément à la norme Européenne EN 1504-9, principe 4, méthode 4.3).

Il fait l'objet du marquage CE obligatoire en production depuis le 01 01 2009.

Pour de plus amples détails, consulter la notice technique.

Désignation	Norme	Caractéristiques		
Tg : température de transition vitreuse (°C) Résine Sikadur®-30	ASTM-D 648	« Heat Deflection Temperature » selon norme ASTM D 648		
		Temps de durcissement	Température	HDT
		3 h	+80°C	53°C
		6 h	+60°C	53°C
	FIP	7 jours	+35°C	53°C
		7 jours	+10°C	36°C
		Température de Transition vitreuse Selon la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte)		
		Temps de durcissement	Température	Tg
	EN 12614	7 jours	+45°C	62°C
		Temps de durcissement	Température	Tg
		30 jours	+30°C	52°C
Masse volumique du mélange ( comp. A + comp. B) à 23°C		1,65 kg/l		

Potlife <ul style="list-style-type: none"> <li>• 8°C</li> <li>• 20°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>	ISO 9514	120 mn 90 mn 20 mn La durée de vie en pot débute quand les 2 composants sont mélangés. Elle est plus courte à hautes températures et plus longue à basses températures. Plus la quantité mélangée est importante, plus la durée de vie en pot est courte. Pour obtenir une durée de vie en pot plus longue à hautes températures, diviser le produit une fois mélangé en plusieurs parties. Une autre méthode consiste à rafraîchir (pas en dessous de 5°C) les composants A et B avant de les mélanger.
Temps ouvert <ul style="list-style-type: none"> <li>• 8°C</li> <li>• 20°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>		150 mn 110 m 50 mn
Température de mise en œuvre (support, ambiance, produit)		+8°C / +35°C
Dureté shore D	NF EN ISO 7619	> 70 à 20°C (à 2 jours)
Résistance au cisaillement Résistance à la compression	EN 196 et FIP	Cisaillement à 1 jour 3 - 5 MPa (15°C) 15 - 18 MPa (35°C) à 14 jours 15 - 18 MPa (15°C) 17 - 20 MPa (35°C) Compression à 1 jour 50 - 60 MPa (10°C) 85 - 95 MPa (35°C)
Résistance à la traction	DIN 53455	à 1 jour 18 - 21 MPa (15°C) 23 - 28 MPa (35°C)
Module d'Elasticité E en traction	ISO 527	11200 MPa
Adhérence	EN 24624 et FIP	Selon EN 24624, sur acier (sablage degré de soin Sa. 2.5) > 21 MPa (valeur moyenne > 30 MPa). Support béton : selon FIP, rupture du support à ~ 4 MPa.

### Conditionnement / Stockage

- Kit de 6 kg comprenant : composant A : 4,5 kg /- composant B : 1,5 kg.

Durée de stockage – conservation : 24 mois à partir de la date de fabrication, quand le produit est stocké dans son emballage d'origine intact, non entamé, à l'abri du gel, de l'humidité et des rayons solaires directs, à une température comprise entre +5°C et +30°C.

### TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

Plat pultrudé PRFC (Polymère Renforcé de Fibres de Carbone – matrice résine époxy)

Orientation des fibres : unidirectionnelle (0°)  
 Fibres à hautes résistances  
 Pourcentage volumétrique des fibres : > 68%

Sika® CarboDur® Lamelle	Type S	Type M
Module d'élasticité E (valeur moyenne)	<b>165 000 MPa</b>	210 000 MPa
Module d'élasticité (valeur minimum)	<b>&gt; 160 000 MPa</b>	> 200 000 MPa
Résistance en traction (valeur moyenne)	<b>3 100 MPa</b>	3 200 MPa
Résistance en traction (valeur minimum)	<b>&gt; 2 800 MPa</b>	> 2 900 MPa
Elongation à rupture (valeur minimum)	<b>&gt; 1,70%</b>	> 1,35%

- Largeur : 50, 60, 80, 100, 150 mm
- Epaisseur : 1,2 mm / 1,4 mm

### Conditionnement

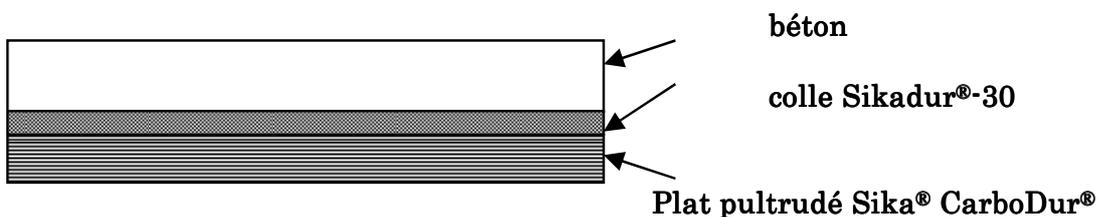
Longueur : Rouleaux 10, 25, 50, 250 mètres  
 Largeur : 50, 60, 80, 100, 150 mm

### Stockage

Illimité à l'abri d'une exposition directe au soleil, au sec et à une température inférieure à 50°C.  
 Transport : uniquement en emballage d'origine ou protégé contre toutes dégradations mécaniques

### COMPOSITE REALISÉ *IN SITU* (cf. chapitre I)

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas  
 (le haut correspond à la partie à renforcer)



### Caractéristiques (valeurs minimales garanties)

Désignation	Norme	Lamelle type S *	Lamelle type M
Module d'élasticité E en traction	EN 2561 avant vieillissement après vieillissement **	<b>&gt; 160 000 MPa</b>	> 200 000 MPa



Application sur ouvrages en service : oui (par exemple : station épuration, ouvrage d'art). Rapports d'essais sur poutre sollicitée en dynamique pendant le durcissement de la colle.

## FICHE TECHNIQUE DE MISE EN OEUVRE du Procédé Sika® CarboDur®

**Systeme** Sika® CarboDur® / Sikadur®-30

### Consommation de colle

Largeur Sika® CarboDur®	Sikadur®-30 (sur support et lamelle)
50 mm	≈ 0,35 kg/m
80 mm	≈ 0,55 kg/m
100 mm	≈ 0,80 kg/m
150 mm	≈ 1,20 kg/m

La consommation peut varier suivant la rugosité et la planéité du support et les éventuels croisements de lamelles.

### Qualité du support

Planéité / irrégularité du support (selon Bulletin FIB 14)

- La surface à renforcer ne doit pas présenter de balèbres de coffrage ni saillies excédant 0,5 mm.
- Vérifier la planéité de la surface à l'aide d'une règle métallique : la tolérance est fixée à 10 mm sous la règle de 2 m, et 4 mm sous la règle de 30 cm.

La qualité du support doit être contrôlée dans tous les cas. Un diagnostic de l'ouvrage est recommandé (norme EN 1504-9, Réparation et protection des structures en béton).

- Support en béton : la résistance moyenne en traction directe de la surface de béton préalablement préparée doit être de 1,5 MPa au minimum. Si ces valeurs ne sont pas atteintes, se reporter à la notice technique du SikaWrap®-230 C/45 pour étudier des solutions alternatives. Le béton doit avoir 28 jours (sinon prendre en considération les conditions environnementales, et les résistances de ce dernier).
- La structure bois, maçonnerie, ou métallique doit également faire l'objet d'un diagnostic.

### Condensation – point de rosée

Attention à la condensation. Au moment de l'application de la colle, la température du support doit être au moins 3 degrés au dessus de la température du point de rosée.

### Méthode d'application / outils

#### Préparation des Sika® CarboDur® Lamelles :

- Poser les Sika® CarboDur® Lamelles sur une surface plane et nettoyer le côté à coller (côté opposé à la face faisant l'objet du marquage du numéro de lot) au moyen d'un chiffon blanc imbibé de Nettoyant Sikadur®. Attendre que la surface soit sèche avant d'appliquer la résine Sikadur®-30. (10 minutes au minimum)
- Préparer le mélange de la colle Sikadur®-30 (voir notice technique).
- A l'aide d'une spatule, tout en respectant le temps ouvert de la

---

colle, appliquer le Sikadur®-30 en double encollage (sur les Sika® CarboDur® Lamelles et sur le support).

- Dans l'intervalle du temps limite d'assemblage, soit 50 minutes environ à 20 °C, positionner et plaquer manuellement la Sika® CarboDur® Lamelle encollée sur le support. Le pouvoir collant du Sikadur®-30 permet de la maintenir sans dispositif d'étaieement particulier.
- A l'aide du rouleau de marouflage, presser fortement sur toute la largeur de la lamelle jusqu'à ce que la colle reflue par les deux côtés. Enlever les reflux de colle époxy à l'aide d'une spatule avant durcissement.

#### **Lamelles juxtaposées**

Dans le cas de juxtaposition de deux ou plusieurs lamelles, prévoir un espace libre d'au moins 5 mm entre elles afin de permettre l'évacuation de l'excès de colle.

#### **Couches multiples**

Si une ou deux lamelles supplémentaires doivent être collées sur la première, alors toutes les faces doivent être préalablement nettoyées au Nettoyant Sikadur immédiatement avant l'opération de collage.

#### **Croisements**

En cas de croisement de lamelles, la première lamelle collée doit être dégraissée à l'aide du Nettoyant Sikadur® à l'endroit du croisement, préalablement au collage de la seconde lamelle.

#### **Protection**

La surface de la lamelle peut recevoir un revêtement de protection à base de liant hydraulique (mortier de la gamme Sikatop®, Sika® Monotop®, Sikarep®), ou à base de résine Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard®-680 S Betoncolor, ou Sikagard®-675 W Elastocolor. Nous consulter pour déterminer le produit le plus adapté au cas rencontré (délai de chantier, délai de recouvrement entre couches, protection complémentaire du béton support en environnement agressif,...).

#### **Plan Assurance Qualité sur chantier**

L'entreprise doit mettre en place un plan d'auto contrôle: en particulier pour vérifier l'état du support et mesurer sa résistance à la traction superficielle, vérifier la non condensation sur le support, mesurer régulièrement la dureté shore D des mélanges de colle Sikadur®-30.

Consulter également l'Avis Technique qui propose un exemple de fiche d'auto contrôle.

---

#### [Protection au feu de la structure](#)

Dès lors que la structure est vérifiée conformément au principe de dimensionnement défini dans le guide AFGC, ou dans l'avis technique du CSTB, aucune protection au feu du système n'est à prévoir :

« structure vérifiée à l'E.L.U. en situation de projet accidentel, sans les Sika® CarboDur® Lamelles, en tenant compte uniquement des aciers internes »

---

[Notes sur  
l'application /  
limites](#)

---

### **Dimensionnement des renforts.**

Il est conseillé de faire appel à un Bureau d'Etudes qualifié en calcul de structures pour réaliser le dimensionnement des renforts Sika® CarboDur® Lamelles.

### **Qualification de l'entreprise spécialisée**

Le Maître d'ouvrage, le Maître d'œuvre, doivent faire appel à une entreprise spécialisée pour la réalisation des travaux de réparation et de renforcement des structures. Pour le domaine du Génie Civil, faire référence à la nomenclature FNTP N°7 Travaux Spéciaux (N° Identification Professionnelle 721). L'entreprise retenue doit être qualifiée, expérimentée, assurée pour la réalisation de ces travaux dits « spéciaux ». Le personnel doit être spécialement formé par le service technique Sika pour l'application des composites PRFC et des produits associés.

**Application des lamelles:** les lamelles doivent être appliquées durant le temps limite d'assemblage du Sikadur®-30.

### **Précautions d'emploi.**

Pendant la préparation, notamment pendant la phase de découpage des lamelles, ainsi que pendant l'application du système, veiller à se conformer aux fiches de données de sécurité (lamelle et résine associée) : porter les Equipements de Protection Individuelle : vêtement adapté, gants, lunettes, appareil respiratoire si nécessaire, ...

### **Protection vis-à-vis des rayons directs solaires**

Les lamelles, une fois mises en place, doivent être protégées du rayonnement solaire direct permanent. Le revêtement de protection vis-à-vis des rayons UV est soit un produit à base de résine (Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard®-680 S Betoncolor, ou Sikagard®-675 W Elastocolor -Coloris disponible suivant nuancier RAL) soit un produit à base de liant hydraulique modifié (Sikatop®-121 ou 107).

### **Température en service**

Des essais en laboratoire montrent que la protection de la lamelle notamment par le revêtement Sikagard®-680 S Betoncolor de couleur blanche permet de limiter la sensibilité du composite vis-à-vis de la température: réduction de 10°C environ de la température au niveau de la lamelle Sika® CarboDur® (comparativement à la lamelle non protégée).

---

**Précautions  
d'emploi**

Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet [www.sika.fr](http://www.sika.fr).

---

**FICHE TECHNIQUE SIKA**  
**Procédé SikaWrap®**

**NOM DU PROCÉDÉ :** SikaWrap®

PRFC : Tissu de fibres de carbone **SikaWrap®-600C C/120** associé à la résine **Sikadur®-300**.

**DOMAINE D'APPLICATION :**

Renforcement de structures en béton armé, maçonnerie et bois, soumises à des contraintes de flexion, de cisaillement, de traction, de torsion :

- Augmentation de la capacité portante
- Renfort et frettage de poteaux
- Changement de destination / réaménagement
- Réparation de dommages
- Mesures préventives parasismiques
- Adaptation aux exigences de changements de normes et prescriptions

**FIBRES DE RENFORCEMENT :** Tissu SikaWrap®

**Nature** :  Carbone  
**Type** : Haute Résistance, unidirectionnel  
**Référence** : Tissu SikaWrap® 600 C/120  
**Provenance** : Sika

**PRODUIT DE COLLAGE : résine Sikadur®-300**

**Composite** (confection) :

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-300	Sika AG

**Interfaces** (adhésif) :

Béton – Composite :

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-300	Sika AG

Composite – Composite :

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	Sikadur®-300	Sika AG

### Spécifications

Le produit Sikadur® 300 est un produit conforme aux exigences de la norme EN 1504-4, en tant que produit de collage structural pour le collage de renforts (conformément à la norme Européenne EN 1504-9, principe 4, méthode 4.3).

Il fait l'objet du marquage CE obligatoire en production depuis le 01 01 2009.

Pour de plus amples détails, consulter la notice technique.

Désignation	Norme	Caractéristiques
Tg : température de transition vitreuse (°C)	ASTM D648 Heat Deflection Temperature	+43°C après 7 jours à +15°C +49°C après 7 jours à +23°C +60°C après 3 jours à +40°C +66°C après 7 jours à +40°C
Masse volumique		1,16 kg/l environ
Durée de vie en pot = Pot life		6 h à +15°C 4 h à +23°C 90 mn à +40°C
Temps ouvert		3h à +15°C – 60 mn à +40°C
Température de mise en œuvre (support, ambiance, produit)		+15°C min/ +40 °C max
Viscosité		2 000 mPas à +15°C 700 mPas à +23°C 200 mPas à +40°C
Résistance à la traction	DIN 53455	45 MPa
Module d'élasticité en flexion	DIN 53452	2800 MPa après 7 jours à 23°C
Module d'élasticité en traction	DIN 53455	3500 MPa après 7 jours à 23°C
Allongement à la rupture	DIN 53455	1,5 % après 7 jours à 23°C
Adhérence	EN 24624	> 4 MPa rupture dans le béton (support sablé)

**Conditionnement / Stockage :**

Kit de 10 kg.

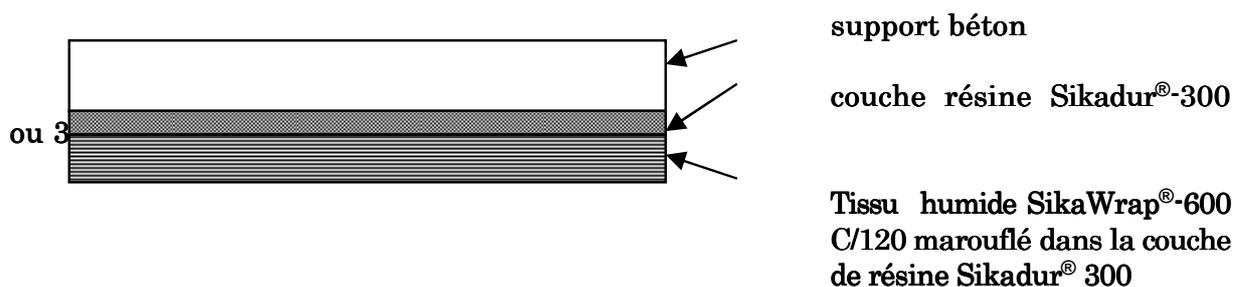
24 mois à partir de la date de fabrication, quand le produit est stocké dans son emballage d'origine intact, non entamé, à l'abri du gel, de l'humidité et des rayons solaires directes, à une température comprise entre +5°C et +25°C.

### TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

		SikaWrap® 600 C/120
<b>Pultrudé</b>	<input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON	
	UD : épaisseur : BD : grammage :	
<b>Tissu humide</b>	<input checked="" type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	
	Orientation des fibres : 0° - Uni directionnel Poids surfacique épaisseur du tissu Résistance à la traction des fibres Module Elasticité en traction des fibres Allongement à la rupture des fibres	600 g/m <sup>2</sup> 0,337 mm 3800 MPa 242 000 MPa 1,55%
<b>Pré-imprégné</b>	<input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON	
<b>Conditionnement</b>	Longueur Largeur	Rouleaux de longueur = 50 m Largeur = 30 cm

### COMPOSITE REALISÉ IN SITU

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas (le haut correspond à la partie à renforcer)



### Caractéristiques

Composite épaisseur 1,3 mm SikaWrap®-600 C/120 + Sikadur®-300	
Module d'Elasticité en traction*	55 kN/ mm <sup>2</sup> (pour une épaisseur 1,3 mm)
Charge ultime pour une couche*	750 kN/m de largeur

Limites : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température en service</li> <li>• Humidité max du support</li> <li>• Croisement</li> <li>• Rayon de courbure mini</li> </ul>	50°C 4% Possible grâce à la faible épaisseur 20 mm mini
---	--

Ces valeurs sont des moyennes, données à titre indicatif à partir d'essais réalisés en laboratoire. Les caractéristiques obtenues lors des tests en traction dépendent du taux d'imprégnation des fibres par la résine, ainsi que de la procédure et des conditions d'essai.

### Paramètres de calcul

Généralement la valeur retenue de l'allongement de calcul est de 0,6%.

Effort repris à 0,6% d'allongement par une couche de composite SikaWrap®-600 C/120 - Sikadur®-300

120 kN / pour une bande de largeur 30 cm

### Spécificités du produit

- Avantages :
  - Facile à appliquer sur des surfaces planes ou courbes (colonnes, cheminées, dômes, silos ...)
  - Utilisable pour le renforcement vis-à-vis des efforts de flexion, de cisaillement, de traction, de torsion
  - Insensible à la corrosion
  - Epaisseur faible, même dans le cas d'application de plusieurs couches de tissu
  - Insensible à la corrosion
  - Encombrement quasi-nul.
- Application sur ouvrage en service : Oui

## FICHE TECHNIQUE DE MISE EN OEUVRE DU PROCÉDÉ SikaWrap®-600 C/120

### Qualité du support

La qualité du support doit être contrôlée dans tous les cas. Un diagnostic de l'ouvrage est recommandé (norme NF EN 1504, Réparation des structures en béton).

Support en béton : la résistance moyenne en traction directe de la surface de béton préalablement préparée doit être de 1 MPa au minimum ou conforme aux spécifications du dossier de consultation.

Les bétons et mortiers doivent avoir au moins 28 jours.

Le support doit être propre, sec, exempt de toute trace de graisse, d'huile, de rouille, de produit de cure, d'ancien revêtement ou traitement de surface, de parties non ou peu adhérentes, de laitance.

La planéité de surface doit rentrer dans la tolérance de  $\pm 2$  mm sur une longueur de 30 cm.

Les balèbres de coffrages et saillies ne doivent pas excéder 0,5 mm. Si nécessaire, ragréer à l'aide de Sikadur®-41F.

Les fissures d'une largeur supérieure à 0,3 mm doivent être injectées à l'aide de Sikadur®-52 injection.

Les angles saillants de la structure doivent être arrondis jusqu'à obtenir un rayon d'au moins 20 mm (fonction du tissu SikaWrap® utilisé); Ceci peut être fait en utilisant une ponceuse à disque diamanté ou réparation à l'aide du Sikadur-41F.

### **Préparation du support**

- Le support doit recevoir une préparation de surface adaptée pour le rendre propre, sain, exempt de laitance, d'agents polluants, de graisse, d'huile, de particules friables, d'anciens revêtements, ...
- Le support ne doit pas être gelé, ni présenter de film d'eau en surface au moment de la mise en oeuvre de la colle.
- Ne pas réaliser d'opération de collage en cas de risque de condensation sur le support. Contrôle à faire préalablement au démarrage du mélange du kit de Sikadur®-300.
- Réparation et reprofilage : si des défauts (carbonatation, faible enrobage) doivent être réparés ou si un reprofilage est nécessaire, les systèmes suivants peuvent être utilisés :

Consulter les notices techniques des produits pour obtenir des détails sur l'application

- Protection des barres d'armatures apparentes corrodées : Sika Monotop®- 610 AC
- Produits de réparation structurale : mortier de réparation à base de résine époxy Sikadur®-41F, Sikadur®-30, ou les mortiers hydrauliques de réparation Sika Monotop®- 412N (application horizontale, verticale, sous face) ou Sika Monotop®- 438 R (application horizontale par coulage).

### **Méthode d'application**

#### **Préparation:**

Avant l'application, contrôler l'humidité du support, l'humidité relative et le point de rosée.

Couper le tissu SikaWrap®-600 C/120 aux dimensions désirées.

#### **Application du primaire :**

L'application du primaire est la même dans le cas de l'application manuelle ou mécanique (par machine type « saturateur »). Appliquer le Sikadur®-300 à la brosse ou la truelle ; si le support présente une rugosité importante, appliquer en remplacement le Sikadur®-330.

Consommation de primaire : entre 0,5 – 1,0 kg/m<sup>2</sup> selon la rugosité du support.

L'application du tissu doit être fait sans attendre.

#### **Imprégnation manuelle du tissu :**

Étaler et fixer une feuille de polyéthylène sur un poste de travail (dédié à l'imprégnation du tissu). Répartir les 2/3 de la quantité prévue de résine Sikadur®-300 sur cette feuille, et positionner le tissu pré découpé aux dimensions voulues sur la

feuille imprégnée de résine. Maroufler le tissu SikaWrap®-600 C/120 dans la direction longitudinale des fibres à l'aide d'un rouleau laine. Verser le 1/3 restant de la résine Sikadur®-300 sur le tissu et la répartir uniformément afin d'imprégner complètement le tissu.

La consommation de résine peut être vérifiée par pesée du tissu avant et après imprégnation par la résine Sikadur®-300.

#### Imprégnation mécanique (par saturateur) :

Soit pré découper le tissu SikaWrap®-600 C/120 ou positionner le rouleau sur le saturateur. « Mouiller » les rouleaux de la machine à l'aide de résine Sikadur®-300 par un écoulement fin et continu entre les rouleaux en rotation (à vitesse lente). Passer le tissu entre les 2 rouleaux du saturateur en rotation régulière à vitesse lente, puis l'enrouler sur le rouleau de stockage (tube en plastique).

Retirer ce rouleau plastique supportant le tissu imprégné ;

Au fur et à mesure, dérouler sur le support le tissu imprégné SikaWrap®-600 C/120.

#### Mise en place et marouflage du tissu :

Placer le tissu imprégné SikaWrap®-600 C/120 sur le support (avec le primaire encore « frais ») dans la direction adéquate. Aplanir et égaliser d'abord manuellement afin d'éliminer les plis. Puis maroufler à l'aide du rouleau de marouflage.

Cette opération se réalise aisément, sans forcer, dans le sens longitudinal des fibres, de façon à évacuer l'air éventuellement emprisonné, sans créer de faux plis, ni déformer le tissu.

#### Application de couche supplémentaire de tissu SikaWrap®-600 C/120 (en fonction des indications fournies par le Bureau d'Etudes)

Appliquer une couche de résine Sikadur®-300 (dans un délai de 2 heures à 23°C après l'application de la couche précédente) sur la couche précédente de tissu encore fraîche et répéter l'opération précédente d'imprégnation et de marouflage. Si ce n'est pas possible, attendre au moins 12 heures avant l'application.

#### Revêtements de finition:

Quand un produit à base de ciment doit être appliqué en tant que revêtement de finition, appliquer une couche supplémentaire de résine Sikadur®-300 à raison de 0,5 kg/m<sup>2</sup>, puis saupoudrer du sable de quartz pour renforcer l'adhérence du revêtement hydraulique.

#### Recouvrement :

Cas de pose dans le sens longitudinal des fibres : le recouvrement du tissu SikaWrap®-600 C/120 doit être d'au moins 100 mm.

Cas de la pose bord à bord: la superposition des couches de tissu posées bord à bord n'est pas nécessaire.

#### Notes sur l'application

Le produit doit être utilisé par des professionnels expérimentés, qualifiés, formés.

La résine Sikadur®-300 doit être protégée de la pluie pendant au moins 24 h après l'application.

Veiller à ce que le positionnement du tissu SikaWrap®-600 C/120 et que le marouflage soient effectués durant le temps ouvert.



Pour des raisons esthétiques et/ou de protection (rayons solaires directs, humidité permanente) le tissu SikaWrap® doit être recouvert en extérieur par application de mortier à base de liant hydraulique modifié (SikaTop®-107, ou SikaTop®-121) ou d'un revêtement de protection à base de résine (Sikagard®-680S BetonColor, Sikagard®-550W Elastic ou Sikagard®-675W ElastoColor).

Pour les applications à basses ou à hautes températures, stocker préalablement les produits pendant au moins 24 h à l'abri du gel, de l'humidité et des rayons solaires directes, à une température ambiante adéquate favorisant le malaxage, l'application, et la durée de vie en pot.

Quand plusieurs couches supplémentaires de tissu SikaWrap®-600 C/120 sont appliquées "frais sur frais" veiller à éviter tout mouvement, tout glissement du composite pendant le durcissement du Sikadur®-300. Le nombre de couches dépend du type de tissu utilisé et des conditions climatiques ambiantes.

### **Précautions d'emploi**

Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur **le site [www.sika.fr](http://www.sika.fr)**.



**FICHE TECHNIQUE SPPM**  
**Procédé COMPODEX C12**

**NOM DU PROCÉDÉ :** **COMPODEX C12**  
**Bénéficie d'un avis technique du CSTB**  
**n° 3/10-644**

**DOMAINE D'APPLICATION :** Renforcement structural passif par collage  
externe sur une structure béton existante

**FIBRES DE RENFORCEMENT**

**Nature :**  Carbone  
**Type :** Très Haute Résistance  
**Nombre de filaments :** 12 K  
**Référence :** P160-3  
**Provenance :** **SPPM**

**RÉSINES :** **ETANCOL 492** ou **OSTRAL 750** (ouvrages constamment  
chauds)

**Interfaces (adhésif)** Béton – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy bicomposant	ETANCOL 492	SPPM
Epoxy bicomposant	ÔSTRAL 750	SPPM

Composite – composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy bicomposant	ETANCOL 492	SPPM
Epoxy bicomposant	ÔSTRAL 750	SPPM

Composite – couches de finition

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy bicomposant	ETANCOL 492	SPPM
Epoxy bicomposant	ÔSTRAL 750	SPPM

**Spécifications (cf. chapitre I pour leur détermination)**

**L'ETANCOL 492 est un produit conforme aux exigences de la norme EN 1504-4, en tant que produit de collage structural pour le collage de renforts.**

ETANCOL 492			
Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
TG : température de transition vitreuse (°C)	ISO 11357-2	54°C ± 2°C	
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> <li>• durcisseur</li> <li>• résine</li> </ul>		1,50 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>	
DPU (durée pratique d'utilisation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5°C</li> <li>• 10°C</li> <li>• 15°C</li> <li>• 20°C</li> <li>• 23°C</li> <li>• 30°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>	ISO 9514	3h30 2h - - 60 mn 40 mn 30 mn	
Température de mise en œuvre		+5°C / +35°C	
Viscosité		300 000 ± 100 000 MPa.s	
Dureté shore D ou Barcoll <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 heures</li> <li>• 2 jours</li> <li>• 7 jours</li> </ul>	NFT 51-10	80 82 83	
Résistance à la traction Allongement à la rupture	ISO 527	29,5 ± 1 MPa 0,65% ± 0,10%	
Résistance au cisaillement Résistance à la compression	ISO 604	> 15 MPa 83 ± 1,6 MPa	
Résistance à la flexion			
Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E (0,2 %) compression</li> <li>• E flexion</li> </ul>	ISO 527 ISO 604 ISO 178	4940 ± 170 MPa 4200 ± 150 MPa 5050 ± 450 MPa	

Adhérence <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sur béton sec sablé</li> <li>• Sur béton humide sablé</li> </ul>	NFP 18852	2,7 ± 0,2 MPa (rupture béton) 2,5 ± 0,2 MPa (rupture béton)	
---	-----------	--	--

### Conditionnement / Stockage

Kits prédosés de 1 kg, 5 kg, 25 kg et double cartouche (2 fois 200 ml), conservation dans leurs emballages d'origine fermés, à l'abri du gel, de la chaleur, de l'humidité, à une température comprise entre 5°C et 25°C. La résine et le durcisseur peuvent être stockés pendant 1 an.

**L'OSTRAL 750 est un produit conforme aux exigences de la norme EN 1504-4, en tant que produit de collage structural pour le collage de renforts.**

ÔSTRAL 750			
Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
TG : température de transition vitreuse (°C) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 7 jours à 23°C</li> <li>• 7 jours à 23°C + 3 h à 60°C</li> <li>• 7 jours à 23°C + 24 h à 60°C</li> </ul>	ISO 11357-2	49°C 75°C 86°C	
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> <li>• durcisseur</li> <li>• résine</li> </ul>		1,46 g/cm <sup>3</sup>	
DPU (durée pratique d'utilisation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5°C</li> <li>• 10°C</li> <li>• 23°C</li> <li>• 30°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>	ISO 9514	Impossible à utiliser 4h 1h 30 1h 35 mn	
Température de mise en œuvre		+10°C / +35°C	
Viscosité		224 000 MPa.s	
Dureté shore D ou Barcoll <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 heures</li> <li>• 2 jours</li> <li>• 7 jours</li> </ul>	ISO 868	74 75 78	
Résistance à la traction Allongement à la rupture	ISO 527	25,7 ± 2,6 MPa 0,5 ± 0,1%	
Résistance à la compression	ISO 604	78 ± 5,9 MPa	
Résistance à la flexion	ISO 178	50,4 ± 4,2 MPa	

Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E (0,2 %) compression</li> <li>• E flexion</li> </ul>	ISO 527 ISO 604 ISO 178	6300 ± 400 MPa 4550 ± 550 MPa 6150 ± 450 MPa	
Adhérence <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sur béton sec sablé</li> <li>• Sur béton humide sablé</li> </ul>	NFP 18852	3,5 ± 0,3 MPa (rupture béton) Application préalable ETANPRIM SH	

### Conditionnement / Stockage

Kits prédosés de 1 kg, 5 kg et 25 kg, conservation dans leurs emballages d'origine fermés, à l'abri du gel, de la chaleur, de l'humidité, à une température comprise entre 5°C et 25°C. La résine et le durcisseur peuvent être stockés pendant 1 an.

### COUCHES DE FINITION

A préciser

### TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

#### Pultrudé

OUI  NON

UD (unidirectionnel) Epaisseur : 1,4 mm  
 BD (bidirectionnel) Grammage : 2 kg/m<sup>2</sup>  
 Pourcentage volumique 65 ± 3 %  
 Orientation :

Autres renseignements : Largeur : 50, 80, 100, 150 mm

#### Tissu sec

OUI  NON

UD (unidirectionnel) Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel) Grammage :  
 Orientation :

Autres renseignements :

**Pré-imprégné**

OUI  NON

UD (unidirectionnel)      Épaisseur :  
 BD (bidirectionnel)      Grammage :  
    Orientation :

Autres renseignements :

**Conditionnement**

Rouleaux :      Poids : 34 kg pour la largeur de 100  
                          Diamètre : caisse en carton pour les rouleaux de 100 mètres  
                          Largeur : 50 – 80 – 100 – 150 mm

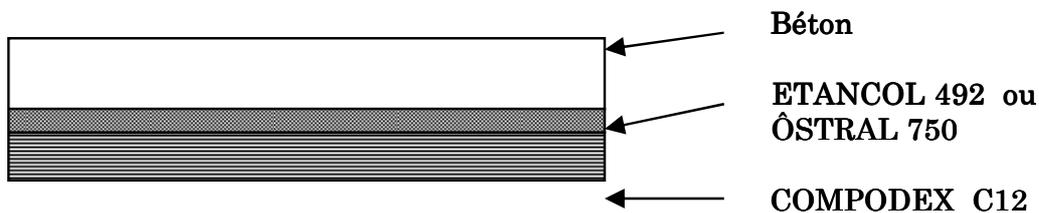
Autres :      Les deux faces sont revêtues d'une bande d'arrachage  
                          Sur une face, une marque tous les 2 m précise  
                          SPPM / COMPODEX C12 / TYPE — / largeur x épaisseur / lot N° — /

**Stockage**

Durée de conservation illimitée à l'abri d'une exposition directe au soleil

**COMPOSITE REALISÉ *IN SITU* (cf. chapitre I)**

**Croquis**      décrivant les différentes couches de haut en bas  
                          (le haut correspond à la partie à renforcer)



**Caractéristiques (valeurs minimales garanties)**

Désignation	Norme	Caractéristiques
Module d'élasticité – traction (Minimum Garantie)	NF EN 2561	> 160 000 MPa
Contrainte à la rupture – traction (Minimum Garantie)	NF EN 2561	> 2800 MPa



**FICHE TECHNIQUE SPPM**  
**Procédé COMPODEX VE/Bi**

**NOM DU PROCÉDÉ :** COMPODEX VE/Bi  
Bénéficie d'un avis technique du CSTB  
n° 3/10-644

**DOMAINE D'APPLICATION :** Renforcement à l'effort tranchant par un tissu de verre bidiagonal des éléments en béton armé.

**FIBRES DE RENFORCEMENT**

- Nature :  Verre
- Type : ADVANTEX
- Nombre de filaments : VP 45 = 600  
VP 70 = 1000
- Référence : VP 45 ou VP 70
- Provenance : SPPM

**RÉSINES :** ÔSTRAL 800

**Interfaces** (adhésif) Béton – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy bicomposant	ÔSTRAL 800	SPPM

Composite – composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy bicomposant	ÔSTRAL 800	SPPM

Composite – couches de finition

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy bicomposant	ÔSTRAL 800	SPPM

L'OSTRAL 800 est un produit conforme aux exigences de la norme EN 1504-4, en tant que produit de collage structural pour le collage de renforts.

ÔSTRAL 800			
Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
TG : température de transition vitreuse (°C)	ISO 11357-2	50°C	
Masse volumique			
DPU (durée pratique d'utilisation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5°C</li> <li>• 10°C</li> <li>• 23°C</li> <li>• 30°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>	ISO 9514	8 h 4 h 3 h 50 min 45 min	
Température de mise en œuvre		+10°C / +35°C	
Viscosité		15 000 MPa.s	
Dureté shore D <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 heures</li> <li>• 2 jours</li> <li>• 7 jours</li> </ul>	ISO 868	66 78 78	
Résistance à la traction Allongement à la rupture	ISO 527	97,2 ± 0,6 MPa 5,2 ± 0,5%	
Résistance à la compression Affaissement à la rupture	ISO 604	30,7 ± 3,9 MPa 1,0 ± 0,2%	
Résistance à la flexion Flèche à la rupture	ISO 178	75,7 ± 8,6 MPa 3,4 ± 0,3%	
Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E (0,2 %) compression</li> <li>• E flexion</li> </ul>	ISO 527 ISO 604 ISO 178	3400 ± 300 MPa 2800 ± 240 MPa 4000 ± 260 MPa	
Adhérence <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sur béton sec sablé</li> <li>• Sur béton humide sablé</li> </ul>	NFP 18852	2,5 ± 0,2 MPa (rupture béton) Application préalable ETANPRIM SH	

### Conditionnement / Stockage

Kits prédosés de 10 kg et 25 kg, conservation dans leurs emballages d'origine fermés, à l'abri du gel, de la chaleur, de l'humidité, à une température comprise entre 5°C et 25°C. La résine et le durcisseur peuvent être stockés pendant 1 an.

### COUCHES DE FINITION

A préciser

### TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

#### Pultrudé

OUI  NON

- UD (unidirectionnel)  
 BD (bidirectionnel)

Autres renseignements :

#### Tissu sec

OUI  NON

- UD (unidirectionnel) Grammage : 350 g/m<sup>2</sup> - VP 45  
 BD (bidirectionnel) Grammage : 700 g/m<sup>2</sup> - VP 70  
Orientation : 2 nappes croisées à - 45° et + 45°

Autres renseignements :

#### Pré-imprégné

OUI  NON

- UD (unidirectionnel) Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel) Grammage :  
Orientation :

Autres renseignements :

### Conditionnement

Rouleaux : Longueur : 60 m.  
Largeur : 1,27 m.

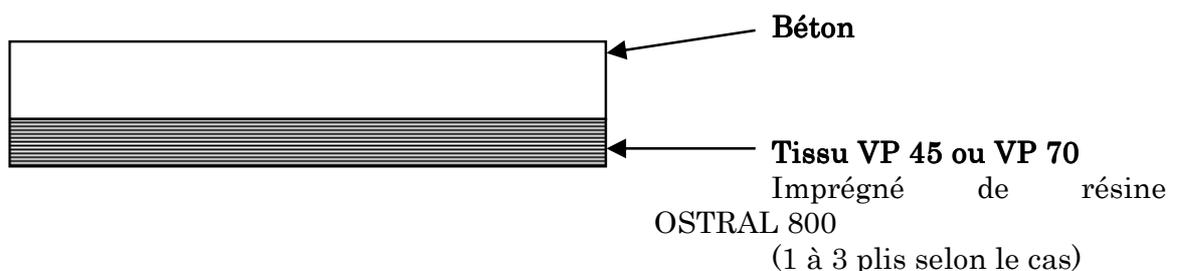
Autres : Les rouleaux sont emballés individuellement dans un film de polyéthylène et conditionnés sur palette de 800 kg maximum. Chaque rouleau comporte une étiquette avec un numéro de lot.

### Stockage

Durée de conservation illimitée à l'abri d'une exposition directe au soleil

### COMPOSITE REALISÉ *IN SITU* (cf. chapitre I)

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas  
(le haut correspond à la partie à renforcer)



**Caractéristiques du Composite (valeurs minimales garanties).**

Désignation	COMPODEX VE/Bi 45	COMPODEX VE/Bi 70
Module d'élasticité à $\pm 45^\circ$	9000 MPa	12 400 MPa
Contrainte à la rupture à $\pm 45^\circ$	100 MPa	140 MPa
Allongement à la rupture à $\pm 45^\circ$	0,011	0,011
Épaisseur du composite : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 pli</li> <li>• 2 plis</li> <li>• 3 plis</li> </ul>	1,1 mm 2,2 mm 3,3 mm	1,5 mm 3 mm 4,5 mm
Nombre de plis : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mini</li> <li>• Maxi</li> </ul>	1 3	1 3
Limites : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Températures</li> <li>• Humidité</li> <li>• Croisement</li> <li>• Rayon de courbure</li> <li>• Autres</li> </ul>	5°C à 35°C en service maxi : saturé "mat	5°C à 35°C en service maxi : saturé "mat



### Spécificités du produit

Avantages :

- Les tissus de verre se drapent facilement pour épouser toutes les formes de structures.
- VP 45 et VP 70 sont constitués de fils inclinés à  $\pm 45^\circ$  et peuvent donc être posés de manière identique à gauche ou à droite et découpés dans la trame ou la chaîne du rouleau.
- Toute erreur de pose est évitée (on ne distingue pas le coté droit ou gauche de la poutre).
- L'inclinaison à  $45^\circ$  permet de coudre les fissures d'effort tranchant également inclinées à  $45^\circ$
- Les tissus ont une bonne mouillabilité et se débulles facilement.
- ÔSTRAL 800 est un liant d'imprégnation époxydique sans solvant, très mouillant, qui permet le maintien sans glissement du tissu pendant sa mise en œuvre jusqu'à la polymérisation de la résine.

Inconvénients :

Application sur ouvrages en service : oui sous certaines conditions.

Autres :

**FICHE TECHNIQUE VSL**  
**Procédé V2C N°1**

**NOM DU PROCÉDÉ :** V2C : lamelle S&P 150/2000et 200/2000

**DOMAINE D'APPLICATION :** Renforcement de structures par lamelles de carbone

**FIBRES DE RENFORCEMENT**

**Nature :**  Carbone

**Type :** C

**Nombre de filaments :**

**Référence :** } cf. Plan d'Assurance Qualité

**Provenance :** }

**RÉSINES :**

**Composite** (confection)

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

**Interfaces** (adhésif) Béton – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	P204	

Composite – composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	P204	

Composite – couches de finition

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

**Spécifications (cf. chapitre I pour leur détermination)**

Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
TG : température de transition vitreuse (°C)			
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> <li>• durcisseur</li> <li>• résine</li> </ul>		1,49 environ	
DPU (durée pratique d'utilisation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5°C</li> <li>• 10°C</li> <li>• 15°C</li> <li>• 20°C</li> <li>• 25°C</li> <li>• 30°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>		- - - 35 mn - - -	
Température de mise en œuvre		+5°C / +45°C	
Viscosité			
Dureté shore D ou Barcoll <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 heures</li> <li>• 2 jours</li> <li>• 7 jours</li> </ul>		> 77 ± 10 %	
Résistance à la traction Allongement à la rupture			
Résistance au cisaillement Résistance à la compression	NFT 51034	30 / 40 MPa	
Résistance à la flexion			
Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E compression</li> </ul>		10 500 MPa	

**Conditionnement / Stockage**

Conditionnement : 1 kg / 5 kg

Stockage : dans son emballage d'origine, à l'abri pendant 1 an

## COUCHES DE FINITION

A préciser

## TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

### Pultrudé

OUI  NON

UD (unidirectionnel)

BD (bidirectionnel)

Epaisseur : 1,2 et 1,4 mm

Grammage : 1,6 g/cm<sup>3</sup>

Orientation :

Autres renseignements :

### Tissu sec

OUI  NON

UD (unidirectionnel)

BD (bidirectionnel)

Epaisseur :

Grammage :

Orientation :

Autres renseignements :

### Pré-imprégné

OUI  NON

UD (unidirectionnel)

BD (bidirectionnel)

Epaisseur :

Grammage :

Orientation :

Autres renseignements :

### Conditionnement

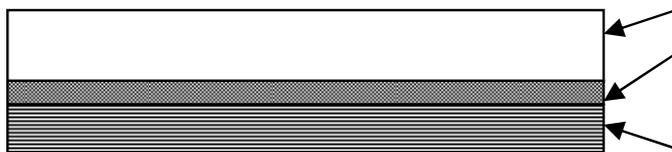
Rouleaux : Longueur : 50 ml ou prédéfinie à la commande  
Largeur : 10 - 50 - 80 - 100 - 120 mm

**Stockage**

A l'abri de l'humidité, dans un local aéré

**COMPOSITE REALISÉ *IN SITU* (cf. chapitre I)**

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas (le haut correspond à la partie à renforcer)



support béton ou autre

résine P204

Lamelle S&P

**Caractéristiques (valeurs minimales garanties)**

Désignation	Norme	Caractéristiques Lamelle 150/2000	Caractéristiques Lamelle 200/2000
Module d'élasticité – traction (fibre uniquement)		> 164 000 MPa	> 205 000 MPa
Contrainte à la rupture – traction		> 2300 MPa	> 2500 MPa
Allongement à la rupture – traction		> 1,4 %	> 1,3 %
Résistance interlaminaire au cisaillement			
Résistance au cisaillement par couche			

**Nombre de couches** mini : 1  
maxi : 3

**Limites** Température : 60°C en service 80°C en accidentel

Humidité du support : < 5% en poids

Croisement : sans limites

Rayon de courbure mini :

Autres :



### Spécificités du produit

Avantages :

- mise en œuvre rapide
- encombrement réduit
- produit (carbone) insensible à la corrosion et aux agents chimiques
- utilisation possible en saignée (lamelle de 10 mm)

Inconvénients :

Application sur ouvrages en service : oui

Autres :

**FICHE TECHNIQUE VSL**  
**Procédé V2C N°2**

**NOM DU PROCÉDÉ :** V2C : S&P C-sheet 240 et 640

**DOMAINE D'APPLICATION :** Renforcement de structures par tissus de fibres de carbone collées

**FIBRES DE RENFORCEMENT**

**Nature** :  Carbone

**Type** : C

**Nombre de filaments** :

**Référence** : }  
**Provenance** : } cf. Plan d'Assurance Qualité

**RÉSINES :** Colle S3 de SRS

**Composite** (confection)

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

**Interfaces** (adhésif) Béton – Composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	P204	

Composite – composite

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE
Epoxy	P204	

Composite – couches de finition

TYPE	RÉFÉRENCE	PROVENANCE

**Spécifications (cf. chapitre I pour leur détermination)**

Désignation	Norme	Caractéristiques	Observations
TG : température de transition vitreuse (°C)			
Masse volumique <ul style="list-style-type: none"> <li>• durcisseur</li> <li>• résine</li> </ul>		1,13 environ	
DPU (durée pratique d'utilisation) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5°C</li> <li>• 10°C</li> <li>• 15°C</li> <li>• 20°C</li> <li>• 25°C</li> <li>• 30°C</li> <li>• 35°C</li> </ul>		- - - 15 mn - - -	
Température de mise en œuvre		+5°C / +30°C	
Viscosité			
Dureté shore D ou Barcoll <ul style="list-style-type: none"> <li>• 24 heures</li> <li>• 2 jours</li> <li>• 7 jours</li> </ul>		> 90 ± 4 %	
Résistance à la traction Allongement à la rupture			
Résistance au cisaillement Résistance à la compression	NFP 15451	100 MPa	
Résistance à la flexion		35 MPa	
Module <ul style="list-style-type: none"> <li>• E (0,2 %) traction</li> <li>• E compression</li> </ul>		3700 MPa	

**Conditionnement / Stockage**

Conditionnement : 1 kg / 5 kg

Stockage : dans son emballage d'origine, à l'abri pendant 1 an

## COUCHES DE FINITION

A préciser

## TRANSFORMATION / PRODUIT MANUFACTURÉ

### Pultrudé

OUI  NON

UD (unidirectionnel) Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel) Grammage :  
Orientation :

Autres renseignements :

### Tissu sec

OUI  NON

UD (unidirectionnel) Epaisseur : C-sheet 240 : 0,117 / 0,176 mm  
 BD (bidirectionnel) C-sheet 640 : 0,19 mm  
Grammage : C-sheet 240 : 200 / 300 g/m<sup>2</sup>  
C-sheet 640 : 400 g/m<sup>2</sup>  
Orientation :

Autres renseignements :

### Pré-imprégné

OUI  NON

UD (unidirectionnel) Epaisseur :  
 BD (bidirectionnel) Grammage :  
Orientation :

Autres renseignements :

### Conditionnement

Rouleaux : Longueur : 150 ml

Largeur : 300 mm

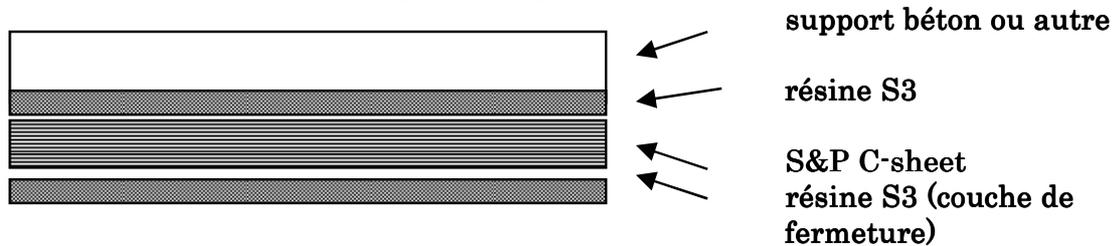
Autres :

### Stockage

A l'abri de l'humidité, dans un local aéré

### COMPOSITE REALISÉ *IN SITU* (cf. chapitre I)

**Croquis** décrivant les différentes couches de haut en bas (le haut correspond à la partie à renforcer)



### Caractéristiques (valeurs minimales garanties)

Désignation	Norme	Caractéristiques		
		S&P C-sheet 240 200 g/m <sup>2</sup>	S&P C-sheet 240 300 g/m <sup>2</sup>	S&P C-sheet 640 400 g/m <sup>2</sup>
Module d'élasticité – traction (fibre uniquement)		84 000 MPa	76 800 MPa	173 000 MPa
Contrainte à la rupture – traction		590 MPa	540 MPa	280 MPa
Allongement à la rupture – traction		> 1,25 %	> 1,25 %	> 0,25 %
Résistance interlaminaire au cisaillement				
Résistance au cisaillement par couche				

**Nombre de couches** mini : 1

maxi : fonction du support

**Limites** Température : 60°C en service 80°C en accidentel

Humidité du support : < 5% en poids

Croisement : sans limites

Rayon de courbure mini :

Autres :

## Spécificités du produit

Avantages :

- mise en œuvre rapide
- encombrement réduit
- produit (carbone) insensible à la corrosion et aux agents chimiques
- utilisation possible en saignée (lamelle de 10 mm)

Inconvénients :

Application sur ouvrages en service : oui

Autres :

### **Kit : Mise en oeuvre**

La préparation du support ayant été réalisée suivant la norme NFP 95-101 et réceptionnée, la mise en œuvre des produits V2C s'effectue de la manière suivante.

#### *1- Conditions d'application*

- Conditions ambiantes :

Hygrométrie de l'air	inférieure à 85 %
Température de l'air	comprise entre 5° et 45°C
Humidité de l'air	inférieure à 85 %
Humidité du support	inférieure à 5 % en poids

#### *2 - Applications du renforcement*

- Préparation des produits de carbone avant collage

Dégraissage des lamelles à l'aide d'un solvant (MEXYL)

Découpe des lamelles et des bandes de tissus aux dimensions indiquées sur les plans

Mélange des 2 constituants de la résine époxy jusqu'à l'obtention d'une teinte homogène.

- Application des lamelles par double encollage

Imprégner le support avec la résine

Étaler également une couche de résine sur la lamelle

Pose de la lamelle (pendant la DPU de la résine) par pression manuelle

Marouflage : l'excédent de colle doit être expulsé latéralement

Nettoyage des excès de colle au couteau

Après polymérisation, nettoyage des lamelles

**Cas d'un croisement des lamelles** : Application d'une résine de reprofilage avant la pose de la lamelle croisée.

**Cas des lamelles insérées** : Remplissage de la saignée nettoyée avant mise en place de la lamelle avec la résine P204 et nettoyage du surplus.

- Application du tissu

### **Kit : Eléments complémentaires**

#### *1- La finition et les revêtements associés*

Après polymérisation, le procédé V2C de renforcement des structures par fibres peut recevoir tout type de peinture compatible avec le support :

- peinture époxy
- peinture polyuréthane

Si une protection particulière est nécessaire, elle peut être appliquée sur le renforcement recouvert d'une couche de résine et sablée manuellement : cette couche de résine sablée sert d'interface entre la matrice époxy et le revêtement. (c'est par exemple le cas pour une protection contre les chocs).

#### *2- Protection au feu*

Lorsque la stabilité au feu de la structure peut être justifié conformément au DTU feu (calcul à la rupture en considérant uniquement les aciers existants), aucun dispositif de protection des aciers n'est à prévoir.

Dans le cas contraire, les renforts prévus doivent être recouverts d'un matériau permettant de garantir une température inférieure à 80°C à l'interface béton-carbone.

### ANNEXE 3 : APPLICATIONS INDUSTRIELLES - ÉVOLUTIONS

Nature des ouvrages	Technologie de mise en oeuvre	Type de réparation (R, S ou P) *	Date	Lieu
Pont	Stratification de tissu sec	R	1993	Fujimi Bridge (Japon)
Pont	Stratification de tissu sec	-	1994	Johetsu Shikansen Bridge (Japon)
Pont	Stratification de tissu sec	-	1994	Yanava Bridge (Japon)
Pont	Stratification de tissu sec	-	1994	Sanahara Bridge (Japon)
Pont	Stratification de tissu sec	-	1994	Yagai Bridge (Japon)
Pont	Stratification de tissu sec	-	1994	Nagashina hotspring Bridge (Japon)
Pont	Stratification de tissus préimprégnés à 100°C <i>in situ</i>	R	1996	Highway Bridge Butler Ohio
Pont	Stratification de tissus préimprégnés à 100°C <i>in situ</i>	R	1997	Great western bank Californie
Pont	Stratification de tissus préimprégnés à 100°C <i>in situ</i>	R	1997	Foulk Road Bridge à Delaware Californie
Pont	Stratification de tissu sec de colonne	-	1996	Cleawater creek Alberta Canada
Pont	Stratification de tissu sec de poutres	R	1996	St Etienne de Bolton Québec
Pont	Stratification de tissu sec de poutres	R	1997	Pont Champlain Montréal
Pont	Stratification de tissu sec de poutres	R	1997	Headinggley Manitoba
Bâtiment	Stratification de tissu sec de colonne	P	1995	Sherbrooke (Canada)
Bâtiment	Stratification de tissu sec de dalle de parking	S	1996	Sherbrooke (Canada)
Bâtiment	Stratification de tissu sec de poutres	S	1997	Winipeg Manitoba
Pont	Stratification de tissu sec	S	1996	Autoroute A10 France
Bâtiment	Stratification de tissu sec de dalles	S	1997	Saint Maurice France

Nature des ouvrages	Technologie de mise en oeuvre	Type de réparation (R, S ou P) *	Date	Lieu
Pont	Stratification de tissu sec de colonnes	R	1999	Bixby creek bridge Californie
Bâtiment	Stratification de tissu sec de dalles	-	1999	Myriad Convention Center Oklahoma
Bâtiment	Collage de plats pultrudés	-	1995	Parking Albany
Pont	Stratification de tissu sec de poutres	-	1996	Charleston bridge Caroline du sud
Pont	Collage de plats pultrudés	-	1997	Country Hills Brige Calgary canada
Pont	Stratification de tissu sec, frottage de colonne	-	1997	Southern Tier Expresway New-York
Pont	Stratification de tissu sec, frettage de colonne	-	1993	Scranten Bridge Pennsylvanie
Bâtiment	Stratification de tissu sec sur des voûtes en maçonnerie	R	1999	Villa Rogio a Ciano Italie
Bâtiment	Stratification de tissu sec, frettage d'un silo a grain	P	1999	Vasteras Suède
Pont	Stratification de tissus sec frettage de colonnes	-	1998	South Temple Bridge Salt Lake city
Plancher	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	S	10/98	Nanterre - Parking Michelet
Dallettes nervurées	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	S	10/98	Epina-y-sur-Seine
Plancher nervuré	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	R	12/98	Orly - Cuisine AOM
Poutres	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	R	02/99	Fos-sur-Mer - Usine Esso
Ames caisson pont en béton précontraint	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	R	1999	Avignon - Pont du Royaume
Frettage têtes De poteaux	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	S	1999	Usine Saint Vallier (26) - Leydier

Nature des ouvrages	Technologie de mise en oeuvre	Type de réparation (R, S ou P) *	Date	Lieu
Plancher	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	S	08/99	Versailles - Parking
Plancher	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	S	02/00	Paris - Rue des Mathurins
Plancher en console	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	S	02/00	Chatou - Cong. Bon Sauveur
Frettage de chevêtre	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	R	05/00	Marseille - Tunnel de l'AJout
PI Autoroute	Renforcement d'ouvrages par composites collés (ROCC®)	S	2000	GTM Le Mans Autoroute A.11
Poutres	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	R	2001	Charpentes à Evry (91)
Plancher	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	R	1999	Paris
Poutres	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	R	2001	Parking Carnot Lille
Silo	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	S	2001	Tours sur Marnes
Poutres	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	R	2001	Colombes (92)
Planchers	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	S	2001	La Queue en Brie (77)
Planchers	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	R	2000	Boulogne (92)
Planchers	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	R	2000	St Ouen l'Aumône (95)
planchers	Collage de plats pultrudés (Compodex C12)	R	2000	Aulnay sous Bois (93)
Pont	Lamelles Sika CarboDur	R, P	2006/2007	Toutry (21)
Cheminée EDF	Lamelles Sika CarboDur	S	2008	Champagne/Oise (95)
Tour télécommunication	Lamelles Sika CarboDur	R, P	2008	Gex (01)
Pont	Lamelles Sika CarboDur	R	2008	Reims (51)

Aéroréfrigérant	Lamelles Sika CarboDur	R, P	2009	Nogent/Seine (77)
Cheminée EDF	Lamelles Sika CarboDur	R, P	2010	Albi (81)
Pont (sur l'Huisne)	Lamelles Sika CarboDur	S	2005	Le Mans (72)
Pont P Heuzé	Lamelles Sika CarboDur	R, P	2001	Caen (14)
Silos (renfort trémie)	Lamelles Sika CarboDur	R, P	2005	La Rochelle (17)
Pont (tenue aux chocs)	Tissu SikaWrap	R, P	2008	Antibes (06)
Station Epuration	Lamelle Sika CarboDur	R, S, P	2004	Les Arcs (83)
Station Epuration	Lamelle Sika CarboDur	R	2004	Montpellier (04)
Aéroréfrigérant (intérieur-extérieur)	Tissu SikaWrap	R, S, P	2004	Allemagne
Silos	Tissu SikaWrap	S	2008	Marseille (13)
Musée	Renforcement par FREYSSINET FOREVA-TFC et LFC	R	2004	VULCANIA
Pont	Renforcement FREYSSINET FOREVA-TFC	R	2008	Pont Charles de Gaulle 25 Besançon
VIPP	Renforcement par FREYSSINET FOREVA-LFC (Lames)	R	2010	21 DIJON
Arènes	Remise en conformité FREYSSINET FOREVA-TFC	S	2005	Arènes de BAYONNE
VIPP	Renforcement FREYSSINET FOREVA-TFC	R	2009	A9- Montpellier
Bât	Réparation Structures FREYSSINET FOREVA-TFC	S	2009	Université P.Sabatier TOULOUSE
Bât	Renforcement de poutres FREYSSINET FOREVA-TFC	R	2009	Maison de retraite Ancely - TOULOUSE
Pont	Renforcement FREYSSINET FOREVA-TFC	R	2009	A52 – Pont de l'étoile

Pont	Renforcement FREYSSINET FOREVA- TFC	R	2010	VPM sud- Nice
Industrie	Réparation FREYSSINET FOREVA-TFC	S	2010	Le port – La réunion
Industrie	Réparation de plots d'antennes- FREYSSINET FOREVA- TFC	S	2010	Iles KERGUELEN
Stade	Renforcement de structures FREYSSINET FOREVA-TFC	R	2009	St Pierre de la Réunion
Pont	Renforcement de structures FREYSSINET FOREVA TFC	R	2007	Vidauban (83)

\*R: renforcement \*S: réparation \*P: protection

## ANNEXE 4 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### Publications

S. Zhang, M. Raouf, L.A. Wood , *“Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with external bonded steel plates”*, Journal of structures and buildings, Vol. 110, N. 3, pp.257-268, UK. 1995.

H. Varastehpour, P. Hamelin, *“Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics”*Materials and structures Volume: 30 Issue: 197 Pages: 160-166 APR 1997

B. Täljsten, *“Strengthening of existing concrete structures with carbon fibre or laminates”*: Swedish National Railboard and roads codes, 1998.

H. Varastehpour, E. Ferrier, P. Hamelin, *“Réparation des ouvrages béton armé – béton précontraint par placage de matériaux composites”*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, No. 3, p. 55-61, juin 1998.

D. Bigaud, H. Nasser, E. Ferrier, P. Hamelin, *“Aide au dimensionnement de poutres béton armé et béton précontraint renforcées par matériaux composites”*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, No. 6, p. 73-79, décembre 1999.

E. Ferrier, G. Lagarde, P. Hamelin *“Concrete beams reinforced by fibre-reinforced plastics: the effect of temperature on the adhesivelayer”* Composites science and technology Volume: 61 Issue: 3 Pages: 425-431 2001

Thériault, M., Claude, S. & Neale, K.W. 2001. *“Effect of size and slenderness ratio on the behaviour of FRP-wrapped columns”*. Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, ed by C.J. Burgoyne, London, PP. 765-771, 2001.

Yang, X., Nanni, A. & Chen, G., 2001. *“Effect of corner radius on the performance of externally bonded reinforcement”*. Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, ed by C.J. Burgoyne, London, PP. 197-204, 2001.

E. Ferrier, P. Hamelin, *“Materials and structures long-time concrete-composite interface characterization for reliability prediction of RC beam strengthened with FRP”*, Materials & Structures, RILEM, Vol 35 N° 253, novembre 2002.

J.F. Berthet, E. Ferrier, P. Hamelin, *“Etude du comportement en compression de colonnes en béton confines par collage externe d'une enveloppe composite : application aux cas des BTHP”*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, No. 2, p. 37-46, avril 2002.

JF Berthet, E. Ferrier, P. Hamelin *“Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study”*Construction and building materials, Volume: 19 Issue: 3 Pages: 223-232, APR 2005

JF Berthet, E. Ferrier E, P. Hamelin “*Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets - Part B: modeling*” Construction And Building Materials Volume: 20 Issue: 5 Pages: 338-347 JUN 2006

G. Promis, E. Ferrier, P. Hamelin “*Effect of external FRP retrofitting on reinforced concrete short columns for seismic strengthening*” Composite Structures Volume: 88 Issue: 3 Pages: 367-379 MAY 2009

F. Colomb, H. Tobbi, E. Ferrier E, et al. “*Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials*” composite structures, Volume: 82 Issue: 4 Pages: 475-487, FEB 2008

Chataigner S, Caron JF, Benzarti K, Quiertant M, Aubagnac C, “*Characterization of FRP-to-concrete bonded interface- Description of the single lap shear test*”. European Journal of Environmental and Civil Engineering. Vol 13, Issue: 9, Special issue: Organic materials for construction. Technical and environmental performances. Nov 2009, pp: 1073-1082.

J. Dumoulin, F. Taillade, Ch. Aubagnac, K. Benzarti, M. Quiertant. “*Infrared Thermography for the nondestructive evaluation of CFRP strenghtened concrete strutures: From Research Laboratory to Field Application. The French Technology of Concrete*” - Special issue for the 3rd International fib Congress – June 2010. p.66-67 and on CD-Rom p. 371-380.

S. Chataigner, M. Rabasse , K. Benzarti, M. Quiertant, C. Aubagnac. “*Durability of adhesively bonded composite reinforcements for concrete structures. The French Technology of Concrete* “ Special issue for the 3rd International fib Congress – June 2010. p.62-63 and on CD-Rom p. 322-332.

E. Ferrier, M. Quiertant, K. Benzarti, P. Hamelin “*Influence of the properties of externally bonded CFRP on the shear behavior of concrete/composite adhesive joints*”. Composites Part B: Engineering, Volume 41, Issue 5, July 2010, Pages 354-362

Avis Technique CSTB n° 3/07-540 Foreva TFC – Eléments de structure renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone, Freyssinet.

Avis Technique CSTB n° 3/07-502 Sika® CarboDur® et SikaWrap®, Renforcement de structures, Sika France S.A.

Avis Technique CSTB n° 3/06-491 ROCC+® - Eléments de structure renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone, GTM Construction.

Avis Technique CSTB n° 3/07-524 V2C® - Eléments de structure renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone, VSL France.

Avis Technique CSTB 3/06-492 CARBOPLATE MAPEWRAP - Eléments de structure en béton armé, renforcés par un procédé de collage de fibres de carbone, MAPEI France.

Cahier des clauses techniques N° 61 Compodex C 12 / VE

## Règlements et recommandations

Japan Concrete Institute, *Non-metallic (FRP) Reinforcement for concrete Structure*, FRPCS-3, Tokyo, 1 and 2, 1997.

ISIS Canada, *Manuels et guides de conception pour renforcer des structures en béton armé à l'aide de PRF appliqués de façon externe*, 2000.

American Concrete Institute, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* ACI Committee 440.2R-2008

*fib* Bulletin No. 40, "FRP Reinforcement in RC Structures", International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, (2007), 160p

CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures ROME – CNR July 13th, 2004.

## Thèses récemment soutenues en France sur le sujet

Varastehpour H., *Optimisation du renforcement des ouvrages en béton armé par des matériaux composites*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 1996.

Nasseri H. R., *Modélisation du comportement non linéaire de poutres béton armé, béton précontraint renforcées par matériaux composites*, Thèse de doctorat, Université Lyon I, 1998.

David E., *Comportement mécanique de poutres en béton armé renforcées ou réparées par collage de matériaux composite- étude expérimentale et modélisation*, Thèse de doctorat 1998.

Ferrier E., *Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermo-stimulé et en fatigue oligocyclique Application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutres BA renforcées*, Thèse de doctorat, Université Lyon I, 1999.

Ovigne P.-A., *Comportement vibratoire de poutres en béton armé fissurées avec renfort en matériau composite*, Thèse de doctorat, Université Lyon I, 2001.

Berthet J.F., *Non linéarité de comportement de colonnes en béton confinées par matériaux composites*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1, 2002.

Gabor A., *Contribution à la caractérisation et à la modélisation des maçonneries non renforcées et renforcées par matériaux composites*, Thèse de doctorat, Université Lyon I, 2002.

Avril S., *Application de la méthode de mesure des champs à la caractérisation de poutre en béton armé réparées par matériaux composites*, Thèse de doctorat, Université Lyon I – Ecole des Mines de Saint Etienne, 2002.

E. Le Bris, *Modélisation de la pénétration d'une colle à solvant dans un milieu poreux. Doctorat Structures et matériaux*, Thèse de doctorat de l'ENPC, 2003.

Z. Yi Wu, *Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue*. Thèse de doctorat de l'ENPC, 2004.

Bruneaux M.-A., *Durabilité des assemblages collés: Modélisation mécanique et physicochimique*, Thèse de doctorat de l'ENPC en co-tutelle avec l'Université de Rome II, 2004.

Mohamed I., *Renforcement par matériaux composites d'ouvrages atteints d'alcali réaction*, Thèse de doctorat, Université Lyon I, 2004.

Rochdi E.-H., *Comportement de dalles béton armé renforcées par composites sous sollicitations biaxiales*, Thèse de doctorat, Université Lyon I, 2004.

Verok K., *Renforcement des structures en béton armé à l'Aide de matériaux composites : étude du frettage et applications*, Thèse de doctorat de l'ENPC, 2005.

Gonzalez D., *Durabilité des assemblages collés du génie civil : Effets du vieillissement hygrothermique aux échelles micro- et macroscopiques*, Thèse de doctorat de l'Université de Clermont-Ferrand, 2006.

Colomb F., *Comportement mécanique sous sollicitations cycliques d'éléments de structures en béton armé renforcé par matériaux composites. Application au renforcement parasismique*, Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 2006.

Promis G., *Composites fibres / matrice minérale. Du matériau à la structure*, Thèse de Doctorat – Université Lyon I, le 5 février 2010.

Marouani S., *Indices de durabilité pour caractériser le vieillissement des polymères mis en œuvre en génie civil*, Thèse de Doctorat, Université Lyon I, le 14 décembre 2007.

Calme O., *Comportement en fatigue de multi-matériaux*, Thèse de Doctorat, Université Lyon I, le 29 novembre 2007.

Michel L., *Comportement Mécanique en rigidité et à rupture des dalles en béton armé renforcées par matériaux composites*, Thèse de Doctorat, Université Lyon I, le 28 novembre 2007.

Al Mahmoud F., *Technologie de renforcement des poutres en béton armé par l'insertion de joncs de carbone*, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 17 décembre 2007.

Chataigner S., *Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites*, Thèse de doctorat Structures et Matériaux, ENPC ParisTech, 12 décembre 2008.

E. Ferrier, *Analyse multi-échelle des mécanismes d'interaction entre matériaux au sein de structures composites du génie civil*, HDR, Université Claude Bernard LYON 1, Ecole doctorale Mega, 23 juin 2006

Castel A., *La corrosion des structures en béton en milieu salin. Analyse du processus, requalification, réparation*, HDR, INSA Toulouse, 10 février 2010.

## Rapport en relation avec le sujet

O. Chaalal, M.-J. Nollet, D.Perraton, *Renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par des lamelles composites collées à l'aide de résine époxy*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées, 212,Nov-Déc 1997, pp. 87-93

LCPC, 1999 : *Réparation et renforcement de structures de génie civil par l'emploi de matériaux composites*. Etude du LCPC, édité par J.L. Clément, 1999.

S. Zhang, M. Raoof, Wood L.A., *Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with externally bonded steel plates*, Journal of structures and buildings, Vo. 110, N° 3, P. 257-268, UK.

Collection des Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées (ERLPC) – série Ouvrages d'art – N° OA 54. Renforcement des ouvrages en béton par collage de composites : Bilan de deux opérations de recherche du LCPC. Mars 2006

Chataigner S., Aubagnac C., Quiertant M., Benzarti K. Essai de cisaillement à simple recouvrement pour caractériser l'adhérence de renforts composites sur substrat béton, Méthode d'essai n°72, 36 pages, Techniques et méthodes des LPC, LCPC, avril 2010.

## Actes de congrès

*International symposium on Fiber reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, FRPCS 1 à 10, Editeur Concrete Society.

*Matériaux composites d'avant garde pour ponts et charpentes*, ACMBS 1, 2, 3, 4, Editeur ASCE.

*International Conference on Composite in Construction*, CCC 2005, Hamelin P., Université Claude Bernard Lyon 1, Service de la Formation Continue.

L. Michel, E. Ferrier, P. Hamelin, *"Seismic Behaviour of RC Shear Wall strengthened by External Bonded CFRP"*, 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, on 27-29 September 2010.

L. Michel, A. Si-Larbi, E. Ferrier, P. Hamelin, *"Anchorage System Mechanical Performance Used for External Bonded CFRP Seismic Reinforcement"*, 5th

International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, on 27-29 September 2010.

E. Ferrier, M. Quiertant, P. Hamelin, "*Fatigue loading effect on RC beams strengthened with externally bonded FRP*", 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, on 27-29 September 2010.

R. Contamine, A. Si Larbi, QT. Nguyen, P. Hamelin, "*Numerical modelling of the shear behaviour of short reinforced concrete beams strengthened by textile reinforced concrete (TRC)*", 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, on 27-29 September 2010.

R. Contamine, A. Si Larbi, E. Ferrier, P. Hamelin, "*Characterization and analytical modelling of tensile behaviour of textile reinforced concrete (TRC)*", 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, on 27-29 September 2010.

A. Si Larbi, R. Contamine, E. Ferrier, P. Hamelin, "*Flexural strengthening of reinforced concrete beams with textile reinforced concrete (TRC)*", 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, on 27-29 September 2010.

E. Ferrier, F. Proulx, P. Labossiere, P. Hamelin, "*Hybrid glulam composites beams reinforced with FRP and ultra high performance concrete*", 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9), 13-15 July 2009, Sydney, Australia.

R. Contamine, A. Si Larbi, E. Ferrier, P. Hamelin, "*Experimental comparison of shear beam behavior strengthened with cement matrix composites and CFRP sheets*", 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9), 13-15 July 2009, Sydney, Australia.

E. Ferrier, A. Si Larbi, P. Hamelin, "*Health monitoring of externally CFRP strengthening of steel reinforced concrete box culverts cell*", 8th International Symposium on Fiber Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), 16 – 18 July 2007, Patras, Greece.

F. Colomb, E. Ferrier, P. Hamelin, "*Anchorage systems for external CFRP strengthening seismic retrofitting*", 8th International Symposium on Fiber Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), 16 – 18 July 2007, Patras, Greece.

F. Colomb, E. Ferrier, P. Hamelin, "*External CFRP reinforcement for seismic retrofitting of short RC columns*", 8th International Symposium on Fiber Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), 16 – 18 July 2007, Patras, Greece.

E. Ferrier, M. Quiertant, P. Hamelin, "*Evaluation of the carrying capacity of RC columns strengthened with composite materials*", Third International IIFC Conference Composite in Civil Engineering (CICE), 13 – 15 December 2006, Miami, Florida.

D. Bigaud, E. Ferrier, P. Hamelin, "*Instability of the composite-to-concrete interface in RC beams strengthened by FRP*", Conférence Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures 6, Singapour, July 2003.

S. Avril, E. Ferrier, P. Hamelin, Y. Surrel, A. Vautrin, *"Flexural repair of reinforced concrete beams by composite materials: optical method for evaluation"*, International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2001, Hong Kong, 12-15 décembre 2001.

L. Curtil, E. Ferrier, S. Ronel, P. Hamelin, *"Composite materials contribution in strengthening concrete structures affected by alkali-aggregate reaction"*, International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2001, Hong Kong, 12-15 décembre 2001.

P. Hamelin, *"AFGC : recommendations concerning repairing and strengthening of concrete structures by composite materials"*, International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2001, Hong Kong, 12-15 décembre 2001.

M. Quiertant, F. Toutlemonde *"Carbon FRP strengthened RC columns under combined flexure-compression loading"* Proceeding of the Second International Conference on FRP Composites in Civil Engineering – CICE 2004 - 8-10 December 2004 - Adelaide, Australia.

M. Quiertant, F. Toutlemonde, JL Clement, *"Combined flexure-compression loading for RC columns externally strengthened with longitudinal and transverse CFRP retrofitting"* Proceeding of the fib Symposium 2004 – April 26-28 – Avignon, France.

## Ouvrages de bases

D. Gay, Matériaux composites, Traité des nouvelles technologies, série mécanique, 1991.

J.M Berthelot, Matériaux composites, Edition Masson, 1992.

AFGC. Documents scientifiques et techniques, fascicule « Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites », juin 2007

Matériaux Organiques spécifiques pour la construction. Sous la direction de Y Mouton. Editions Hermès-Lavoisier. Sept 2010.

P. Hamelin, *Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites*, Techniques pour l'Ingénieur, Référence AM 5 615, Date de publication le 10 avril 2002.

P. Hamelin, *Polymères renforcées de fibres FRP dans la construction. Partie I « Identification et champs d'application »*, Techniques pour l'Ingénieur, Référence C950, Date de publication le 10 août 2010.

## ANNEXE 5 : TABLEAU DES NOTATIONS EC2, EC8, AFGC 2007 ET 2009

### Notations

EC2 EC8-3	AFGC 2010	AFGC 2007	Définition
$A_c$	$A_c$	B	Aire d'une section de béton
-	$A_f$	$A_f$	Aire d'une section de composite
$A_p$	$A_p$	$A_p$	Aire d'une section d'acier de précontrainte
$A_s$	$A_s$	$A_s$	Aire d'une section d'acier tendue ou longitudinaux
-	$A_s'$	$A_s'$	Aire d'une section d'acier comprimée
-	$A_{sy}$	$A_{sy}$	Section d'aciers longitudinaux dans la direction y
-	$A_{sz}$	$A_{sz}$	Section d'aciers longitudinaux dans la direction z
$C_{Rd,c}$	$C_{Rd,c}$	$C_{Rd,c}$	Coefficient défini par l'Eurocode 2
D	D	-	Diamètre d'un poteau
-	$E_{ad}$	$E_{ad,d}$ ou $E_{ad}$	Module d'élasticité de l'interface composite-béton en traction
-	$E_{ad,c}$	-	Module d'élasticité de l'interface composite-béton en compression
$E_{cm}$	$E_c$	$E_c$	Module d'Young du béton
$E_f$	$E_f$	$E_f$	Module d'Young du composite
-	$E_p$	$E_p$	Module de confinement de la section Module d'Young de l'acier de précontrainte
$E_s$	$E_s$	$E_s$	Module d'Young de l'acier
-	$F_{ade}$	$F_{ad,e}$	Effort de traction élastique maximum dans l'interface composite-béton
-	$F_f$	F ou $F_f$	Effort dans le composite
-	$F_{f\ ELS}$	$F_{ELS}$	Effort repris par le composite à l'ELS (après la zone de transfert)
-	$F_{f\ ELU}$	$F_{ELU}$	Effort repris par le composite à l'ELU
-	$F_s$	$F_s$	Effort normal repris par les aciers passifs tendus
-	$F'_s$	$F'_s$	Effort normal repris par les aciers passifs comprimés
-	$G_{ad}$	$G_{ad}$	Module de cisaillement de l'interface composite-béton

-	$G_f$	$G_f$	Module de cisaillement plan du composite
-	$I$	$I$	Inertie homogénéisée de la section
$M_{Rd}$	$M_{Rd}$	$M_u$	Moment fléchissant
-	$M_{Rdc}$	$M_{bu}$	Moment fléchissant repris par le béton
-	$M_{Rdf}$	$M_f$	Moment fléchissant repris par le composite
-	$M_{Rds}$	$M_A$	Moment fléchissant repris par les aciers passifs tendus
$N_{Ed}$	$N_{Ed}$	$N_{sd}$	Effort normal appliqué à la section
-	$N_{Rd}$	$N_u$	Effort normal pouvant être repris par un poteau confiné
$R$	$R$	$r_c$	Rayon de courbure de la section
-	$R_f$	$R_f$	Résistance maximale à la traction de la section de composite
-	$T_g$	$T_g$ ou $T_G$	Température de transition vitreuse
$V_{Ed}$	$V_{Ed}$	$V_u$	Effort tranchant ou de poinçonnement appliqué à la section
$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,c}$	$V_b$	Effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armatures d'effort tranchant
$V_{Rd,f}$	$V_{Rd,f}$	$V_f$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par le composite
$V_{Rd,max}$	$V_{Rd,max}$	$V_u$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par l'élément, avant écrasement des bielles de compression
$V_{Rd,s}$	$V_{Rd,s}$	$V_a$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par les armatures d'effort tranchant travaillant à la limite d'élasticité
$b$	$b$ ou $b_w$	$b$	Épaisseur brute de l'âme d'une poutre Grand côté d'un poteau
$c_1$	$c_1$	$c_1$	Dimension du poteau parallèlement à l'excentricité de la charge
$c_2$	$c_2$	$c_2$	Dimension du poteau perpendiculairement à l'excentricité de la charge
$d$	$d$	$d$	Distance entre le barycentre d'armatures tendues à la fibre extrême la plus comprimée
$2d$	$2d$	$2d$	Longueur utile du renforcement
-	$d_{eff}$	$d_{eff}$	Hauteur utile moyenne
-	$d_x$	$d_x$	Hauteur utile dans la direction x
-	$d_y$	$d_y$	Hauteur utile dans la direction y
-	$d'$	$d'$	Distance entre les aciers passifs et la fibre tendue

-	$f_{ad}$	$f_{ad}$	Résistance à la traction de la colle ou la résine à l'interface composite-béton
$f_{cd}$	$f_{cd}$	$f_{c,d}$ $\sigma_{blim}$	Résistance du béton en compression de calcul
$f_{cd,c}$	$f_{cd,c}$	$f'_{cc,d}$	Résistance de calcul du béton confiné
-	$f_{cd,u,c}$	$f_{ccd}$	Résistance ultime de calcul du béton confiné
$f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_c$	Résistance caractéristique du béton en compression, mesurée sur cylindre à 28 jours
$f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_{ck}$	Contrainte caractéristique à la compression du béton
$f_{ctk}$	$f_{ctk}$	-	Résistance caractéristique en traction directe du béton
-	$f_{fd,\theta}$	$\sigma_{f,\theta}$	Résistance caractéristique du renfort composite, en fonction de l'orientation
$f_{fd}$	$f_{fd}$	$\sigma_{f,d}$	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELS
$f_{u,f}$	$f_{fu}$	$f_{fu,d}$	Contrainte moyenne de traction à rupture du composite
$f_{u,fd}$	$f_{fud}$	$f_{f,d}$	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELU
-	$f_{hm}$	-	Résistance moyenne du support en traction directe
$f_{pd}$	$f_{pd}$	-	Résistance de calcul en traction des aciers de précontrainte
$f_{pk}$	$f_{pk}$	-	Résistance caractéristique en traction des aciers de précontrainte
$f_{p0.1k}$	$f_{p0.1k}$	-	Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0.1% des aciers de précontrainte
$f_l$	$f_l$	$f_{pu,d}$	Pression de confinement ultime
$f_{yd}$ ou $\sigma_s$	$f_{yd}$	$f_{a,d}$	Limite d'élasticité de calcul de l'acier de béton armé
$f_{yk}$	$f_{yk}$	$f_a$	Limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé
$h$	$h$	$h$	Épaisseur d'une membrure de béton Petit coté d'un poteau ou épaisseur d'une dalle
-	$h_f$	$h_f$	Hauteur totale du composite
-	$k_c$	$k_c$	Coefficient de forme de la section
-	$k_h$	$k_h$	Coefficient de forme du composite
-	$l_{anc}$	$l_{anc}$	Longueur d'ancrage du composite
-	$l'_{anc}$	$l'_{anc}$	Longueur de transfert majorée
-	$l_{anc,d}$	$l_{anc,d}$	Longueur d'ancrage de calcul du composite
-	$l_{anc,exp}$	$l_{anc,exp}$	Longueur d'ancrage du composite déduite des essais
-	$l_{anc,th}$	$l_{anc,th}$	Longueur d'ancrage théorique du composite

-	$l_{anc,Vu}$	$l_{anc,Vu}$	Longueur d'ancrage du composite choisie pour le calcul à l'effort tranchant
-	$l_{rec}$	$l_{rec}$	Longueur de recouvrement du composite
-	$l_{trans}$	$l_{trans}$	Longueur de transfert
n	n	n	Coefficient d'équivalence acier-béton
-	$n_f$	$n_f$	Coefficient d'équivalence composite-béton
-	$n_p$	$n_p$	Nombre de plis de composite
$s_f$	$s_f$	$S_f$	Espacement entre les bandes de composite
s	s	$S_t$	Espacement entre cadres transversaux
-	$t_{ad}$	$t_{ad}$	Épaisseur de l'interface composite-béton
$t_f$	$t_f$	$t_f$	Épaisseur du composite
-	$t_{f,ELU}$	$t_{f,ELU}$	Épaisseur minimale de composite pour résister en flexion à l'ELU
$u_{out,ef}$	$u_{out,ef}$	$u_{out,ef}$	Contour de contrôle de référence
$u_1$	$u_1$	$u_1$	Périmètre du contour de contrôle de référence
-	$u_{1,f}$	$u_{1,f}$	Longueur de bandes sollicitées
-	$v_{add}$	$\tau_{ad,d}$ (ELS)	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELS
-	$v_{adud}$	$\tau_{ad,d}$ (ELU)	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELU
-	$v_{cmax}$	$\tau_{max,ELS}$	Taux de cisaillement maximum à l'ELS dans le béton d'enrobage
-	$v_{cumax}$	$\tau_{max,ELU}$	Taux de cisaillement maximum à l'ELU dans le béton d'enrobage
-	$v_{Ed}$	$\tau_u$	Taux de cisaillement moyen à l'ELU
$v_{min}$	$v_{min}$	$v_{min}$	Contrainte définie par l'Eurocode 2
$v_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$	Contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle sans armatures de poinçonnement le long de la section de contrôle considérée
$v_{Rd,cf}$	$v_{Rd,cf}$	$v_{Rd,cf}$	Contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement d'une dalle sans armatures de poinçonnement renforcée par matériaux composites le long de la section de contrôle considérée
$v_{Rd,f}$	$v_{Rd,f}$	$v_{Rd,f}$	Contrainte de calcul de la résistance au poinçonnement de la partie renforcement composite le long de la section de contrôle considérée
-	y	y	Profondeur de l'axe neutre pour une section calculée vis-à-vis de l'état limite de service
$w_f$	$w_f$	$b_f$	Largeur de la bande de composite
-	$z_f$	$Z_f$	Bras de levier du composite
$z$	$z_s$	$Z_a$	Bras de levier des aciers passifs

-	$\epsilon_{xy,adu}$	$\gamma_{ad}$ ou $\gamma_{adu}$	Déformation limite moyenne de cisaillement de l'interface
-	$\epsilon_{xy,ade}$	$\gamma_{ad,e}$	Déformation limite moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique
$\alpha$	$\alpha$	$k_1$	Coefficient d'efficacité du confinement
-	$\alpha_{ad}$	$\alpha_{ad}$	Coefficient de réduction au niveau de l'interface pour tenir compte des effets différés
-	$\alpha_f$	$\alpha$	Coefficient de réduction pour tenir compte de l'effet long terme
-	$\alpha_v$	$\alpha_v$	Rapport des longueurs d'ancrage (cas de l'ancrage partiel)
$\beta$	$\beta$	-	Angle d'inclinaison du composite par rapport à la fibre moyenne
	$\beta$		Coefficient de positionnement de la charge dans le cas du poinçonnement
$\epsilon_c$	$\epsilon_c$	$\epsilon_c$	Déformation du béton
$\epsilon_{c2}$	$\epsilon_{c2}$	-	Déformation du béton atteinte pour la contrainte de compression maximale
$\epsilon_{cu2}$	$\epsilon_{cu}$	-	Déformation ultime du béton en compression
$\epsilon_f$	$\epsilon_f$	$\epsilon_f$	Déformation du composite
-	$\epsilon_{fd}$	$\epsilon_{fd}$	Déformation limite du composite dans l'équilibre de section prenant en compte la présence d'aciers passifs
$\epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fu}$	Déformation ultime du composite
-	$\epsilon_{fud}$	$\epsilon_{fu,d}$	Déformation ultime de calcul du composite
-	$\Delta\epsilon_f$	$\Delta\epsilon$	Différentiel de déformation au sein du composite
$\epsilon_s$	$\epsilon_s$	$\epsilon_s$	Déformation des aciers passifs tendus
-	$\epsilon'_s$	$\epsilon'_s$	Déformation des aciers passifs comprimés
$\epsilon_{s0}$	$\epsilon_{s0}$	$\epsilon_{a0}$	Déformation des aciers passifs au moment de la réparation
-	$\epsilon_{se}$	$\epsilon_{se}$	Déformation limite élastique des aciers passifs ( $= f_{yd} / E_s$ )
$\epsilon_{ud}$	$\epsilon_{sud}$	$\epsilon_{su}$	Déformation ultime de calcul de l'acier
$\epsilon_{uk}$	$\epsilon_{suk}$	$\epsilon_{su}$	Déformation ultime caractéristique de l'acier
-	$\gamma_{ad}$	$\gamma_{ad}$	Coefficient partiel de sécurité sur l'adhésif
$\gamma_c$	$\gamma_c$	$\gamma_b$	Coefficient partiel de sécurité sur le béton
$\gamma_{fd}$	$\gamma_f$	$\gamma_f$	Coefficient partiel de sécurité sur le composite
$\gamma_s$	$\gamma_s$	$\gamma_s$	Coefficient partiel de sécurité sur l'acier
-	$\gamma_{td}$	$\gamma_{td}$	Coefficient partiel de sécurité sur le béton à l'arrachement
-	$\psi$	$\psi$	Coefficient prenant en compte l'épaisseur de renfort

-	$\chi$	$\chi$	Coefficient fonction du type de renfort
-	$\gamma_\lambda$	$\alpha$	Coefficient de sécurité au flambement
-	$\psi_f$	$\psi_f$	Coefficient de performance
$\rho_l$	$\rho_l$	$\rho_l$	Taux de ferrailage longitudinal (=A <sub>s</sub> /A <sub>c</sub> )
-	$\rho_{ly}$	$\rho_{ly}$	taux de ferrailage longitudinal dans la direction y
-	$\rho_{lz}$	$\rho_{lz}$	Taux de ferrailage longitudinal dans la direction z
-	$\sigma_{ad}$	$\sigma_{ad}$	Contrainte normale à l'interface
-	$\sigma_f$	$f_f$	Contrainte de traction dans le composite
-	$\sigma_s$	$\sigma_s$	Contrainte normale dans les aciers passifs
-	$\tau_{ad}$	$\tau_{ad}$	Contrainte de cisaillement à l'interface
-	$\tau_{ad,e}$	$\tau_{ad,e}$	Contrainte moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique
-	$\tau_{ad,u}$	$\tau_{ad,u}$	Contrainte moyenne ultime de cisaillement à l'interface
-	$\tau_{fdd}$	$\tau_{fdd}$	Contrainte de cisaillement interlaminaire du composite
$\theta$	$\theta$	-	Angle d'inclinaison des fissures par rapport à la fibre moyenne
-	$\nu_f$	$\nu_f$	Coefficient de poisson du composite
$\Theta$	$\Theta$	$\theta$	Angle de poinçonnement



Réparation et renforcement des structures en béton au moyen  
des matériaux composites