

Avis Technique 3.3/19-990_V1

Annule et remplace l'Avis Technique 3/14-773 et 3/14-773*01 Mod

*Renforcement d'éléments
de structure par collage de
plaques ou plats
composites*

*Repair and Strengthening
of structural elements of
constructions with fiber
reinforced polymers (FRP) -
laminates*

SYSTÈME S&P C-Laminate

Titulaire : Société : S&P Renforcement France.
Z.A.C des Quatre Chemins.
FR – 85400 Sainte Gemme La Plaine.
Tél : +33 25 128 44 77.
Fax : +33 25 128 44 78.
E-mail : info@sp-reinforcement.fr
Internet : www.sp-reinforcement.fr

Groupe Spécialisé n° 3.3

Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure

Publié le 19 juillet 2019



Commission chargée de formuler des Avis Techniques et Documents Techniques
d'Application

(arrêté du 21 mars 2012)

Secrétariat de la commission des Avis Techniques
CSTB, 84 avenue Jean Jaurès, Champs sur Marne, FR-77447 Marne la Vallée Cedex 2
Tél. : 01 64 68 82 82 - Internet : www.ccfat.fr

Le Groupe Spécialisé n°3.3 « Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure » de la Commission Chargée de formuler les Avis Techniques a examiné le 11 avril 2019, le procédé de renforcement par collage de plats composites SYSTÈME S&P C-Laminate, présenté par la société S&P Renforcement France. Il a formulé sur ce procédé l'Avis Technique ci-après. Cet Avis annule et remplace l'Avis Techniques 3/14-773 et 3/14-773*01 Mod. Cet Avis a été formulé pour les utilisations en France Métropolitaine.

1. Définition succincte

1.1 Description succincte

Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller à la surface ou dans les éléments visés des lamelles de carbone à l'aide d'une résine époxydique synthétique à deux composants.

Les lamelles gravées sont principalement utilisées pour le renfort en flexion en partie supérieure de dalle ou de poutre, mais d'autres utilisations sont possibles.

Ce procédé est destiné à augmenter la capacité portante des éléments concernés, par fonctionnement mécanique conjoint élément-renfort, grâce à l'adhérence conférée par la résine après son durcissement, entre les deux matériaux.

1.2 Identification

Les composants sont livrés sur le site de mise en œuvre, identifiés de la manière suivante :

- Lamelles carbone S&P C-Laminate SM et S&P C-Laminate HM: présentation en couronnes ou en barres droites. Les lamelles sont identifiées par leur dénomination et un numéro de lot, imprimés à intervalles réguliers sur la lamelle. Ces lamelles sont livrées prédécoupées en usine sur mesure ou en couronnes de 100 et 150 mètres en fonction de la largeur.
- S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP, colles pour S&P C-Laminate collées en surface ou engravées ou le reprofilage de faible épaisseur : Colles époxydiques bi-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en kits de 5kg, 15kg ou autres conditionnements sur demande, devant être stockés au sec entre 5 et 25°C avant utilisation.
- S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP, colles pour S&P C-Laminate engravée : Colles époxydiques bi-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en pots métalliques de 6 kg, 13 kg ou autres conditionnements sur demande.
- S&P RESIN 230 ou S&P Resin 230 HP : Mortier époxy tri-composants utilisé pour reprofiler le support avant application des lamelles S&P C-Laminate.

2. AVIS

L'Avis qui est émis prend en compte le fait que ni la conception ni le dimensionnement du renforcement ne sont effectués par ou sous la responsabilité de S&P.

Cet Avis ne vaut que si :

- Le dimensionnement est réalisé par un bureau d'étude spécialisé dans le calcul de renforcement de structure ;
- Les entreprises applicatrices de ce procédé de renforcement ont reçu une formation pratique et théorique délivrée par le Titulaire.

2.1 Domaine d'emploi accepté

L'Avis n'est valable que si la température de la résine, et celle du support au niveau du collage, n'excèdent pas les températures en service continu (supérieure à 24h) et en pointe (pendant 24h) indiquées dans le Dossier Technique établi par le demandeur.

Le domaine d'emploi accepté par le Groupe Spécialisé n°3.3 est celui couvrant les éléments en béton armé entrant dans la constitution des bâtiments courants (habitations, bureaux, etc.) et des bâtiments industriels (supermarchés, entrepôts, etc.) Les éléments renforcés par le procédé sont :

- En béton armé ;
- En béton précontraint.

Les éléments concernés sont sollicités par des charges à caractère principalement statique, comme c'est le cas dans les bâtiments administratifs, commerciaux, scolaires, hospitaliers, d'habitation, de bureaux, parkings pour véhicules légers (30 kN de charge maximale à l'essieu).

L'augmentation des capacités résistantes par les procédés de renforcement est limitée aux actions rapidement variables.

L'utilisation en bâtiments industriels est admise tant que l'agressivité chimique ambiante peut être considérée comme normale et que les charges non statiques ne sont pas de nature répétitive entretenue pouvant donner lieu à fatigue. On peut citer, à titre d'exemple de charges exclues, les machines tournantes et les passages intensifs et répétés de camions.

L'utilisation des procédés pour le renforcement des dallages n'est pas visée dans le cadre du présent Avis Technique.

Le renforcement structurel de radiers est visé.

Les utilisations pour lesquelles l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié impose l'application des règles parasismiques et le cas des sollicitations susceptibles de changer de sens ne sont pas visées dans le cadre du présent Avis Technique.

Le procédé SYSTÈME S&P C-Laminate n'est utilisé que pour le renforcement en flexion

Les utilisations autres que celles prévues au présent domaine d'emploi, notamment les renforcements d'éléments constitués de matériaux autres que le béton (maçonnerie ou bois), sortent du champ du présent Avis. L'Avis n'est valable que si la température de la résine et du support au niveau du collage n'excède pas :

- 47°C en pointe et 37°C en continu pour S&P Resin 220 et S&P Resin 230 ;
- 52°C en pointe et 40°C en continu pour les S&P Resin 220 HP et S&P Resin 230 HP ;
- 44 °C en pointe et 34°C en continu pour les S&P Resin 55 ;
- 48°C en pointe et 37°C en continu pour les S&P Resin 55 HP

Les Prescriptions Techniques (paragraphe 2.3 du présent Avis) précisent les conditions dans lesquels le renforcement par le procédé C-Laminate S&P peut être envisagé.

L'avis est émis pour les utilisations en France métropolitaine.

2.2 Appréciation sur le procédé

2.2.1 Satisfaction aux lois et règlements en vigueur et autres qualités d'aptitude à l'emploi

2.2.1.1 Stabilité

L'examen des performances de durabilité du complexe lamelle-résine, au travers des essais de fluage effectués par le demandeur, permet de conclure que le procédé conduit à l'augmentation des capacités résistantes des éléments renforcés, conformément aux modèles de calcul développés dans le Dossier Technique établi par le demandeur, à condition de respecter strictement les prescriptions données au §2.3 du présent Avis.

2.2.1.2 Sécurité en cas d'incendie

Réaction au feu

En l'absence de Procès-Verbal de réaction au feu, les éléments entrant dans la constitution du système C-Laminate S&P sont non-classés ou classés F au sens des Euroclasses.

Résistance au feu

En ce qui concerne la résistance au feu, le système de renforcement C-Laminate S&P non protégé ne participe pas à la tenue des éléments renforcés. Lorsqu'une protection au feu est prévue par-dessus le composite, elle devra justifier d'un essai de résistance au feu, effectué sur un support identique, par un Laboratoire agréé par le Ministère de l'Intérieur. L'attention est attirée sur le fait que les caractéristiques mécaniques de la colle diminuent rapidement lorsque la température augmente.

2.2.1.3 Prévention des accidents lors de la mise en œuvre

Pour la manipulation de la colle et son application, il y a lieu de respecter les prescriptions du Code du travail concernant les mesures de protection relatives à l'utilisation des produits contenant des solvants, utilisés pour le nettoyage des outils. En dehors de ce point, les conditions de mise en œuvre ne sont pas de nature à créer d'autre risque

spécifique. Il faut consulter les fiches de sécurité des produits avant manipulation.

Données environnementales

Le procédé C-Laminate S&P ne dispose d'aucune Déclaration Environnementale (DE) et ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière. Il est rappelé que les DE n'entrent pas dans le champ d'examen d'aptitude à l'emploi du procédé.

Aspects sanitaires

Le présent avis est formulé au regard de l'engagement écrit du titulaire de respecter la réglementation, et notamment l'ensemble des obligations réglementaires relatives aux produits pouvant contenir des substances dangereuses, pour leur fabrication, leur intégration dans les ouvrages du domaine d'emploi accepté et l'exploitation de ceux-ci. Le contrôle des informations et déclarations délivrées en application des réglementations en vigueur n'entre pas dans le champ du présent avis. Le titulaire du présent avis conserve l'entière responsabilité de ces informations et déclarations

2.22 Durabilité - Entretien

La durabilité des éléments renforcés est normalement assurée dans le domaine d'emploi accepté. Comme précisé à l'article 2.1, cet Avis ne vise pas les utilisations en locaux (ou ambiances) suivants :

1. Atmosphère agressive (type solvant) ;
2. Lorsque la température est susceptible de dépasser la valeur en pointe indiquée dans le Dossier Technique établi par le Demandeur (valeur de pointe : valeur dont la durée de maintien est inférieure à 24 heures) de la résine utilisée.

• En effet, pour le premier cas, la stabilité des caractéristiques mécaniques de la colle n'est pas démontrée. Pour la seconde restriction, la température de transition vitreuse de la résine ne permet pas de dépasser une température en pointe indiquée au chapitre 2.1 du présent Avis.

Dans le cas où des dégradations (chocs, abrasion, etc.) sont possibles, une protection mécanique du renforcement est à prévoir.

2.23 Fabrication et contrôle

Les éléments entrant dans la constitution du procédé sont fabriqués dans des usines spécialisées.

La fabrication des lamelles, ainsi que celle de la colle, font l'objet d'un plan d'assurance-qualité dans les usines concernées.

2.24 Finitions

Lorsque des revêtements (notamment peintures) sont prévus sur le renforcement, ils doivent avoir fait l'objet d'essais préalables validant leur adhérence sur la matrice époxydique des composites.

Dans le cas d'une utilisation du procédé de renforcement en face supérieure des dalles, le système de renforcement doit être protégé par un mortier. Ceci ne concerne pas le S&P C-Laminate avec lamelles engravées qui sont protégées de par leur mise en œuvre.

2.3 Prescriptions techniques

Le renforcement des éléments de structure peut induire la nécessité d'une reprise en sous œuvre des fondations, due aux majorations ou aux redistributions des efforts dans les éléments porteurs ou de remplissage en maçonnerie.

2.31 Conditions de conception et de calcul

Le dimensionnement du renforcement doit être réalisé par un bureau d'études de structure. S&P met à la disposition des calculateurs des logiciels de dimensionnement développés en interne et utilisé en Europe depuis 2000. La responsabilité des résultats et donc de la structure du logiciel revient au Titulaire. Toutefois, le bureau d'étude structure utilisateur du logiciel reste responsable de la bonne utilisation du logiciel suivant le cahier des charges fourni et de la définition des hypothèses et des données d'entrée.

2.311 Justification à la rupture

Cette justification est à effectuer dans tous les cas hors situation d'incendie. Elle doit être réalisée en prenant en compte la hauteur totale de la section de l'élément à renforcer (ex : pour une poutre en T, il convient de considérer la hauteur totale de la section avec la table de compression). Elle consiste en une vérification de l'élément à la rupture, toutes redistributions effectuées, et sans tenir compte du renforcement, sous la combinaison ELS rare (considérée conventionnellement dans les calculs comme combinaison ELU fondamentale) $G+Q_1+\sum_{\psi_{0i}}Q_i$, où G représente la sollicitation due à la charge permanente et $\sum_{\psi_{0i}}Q_i$ celle due aux charges de courte durée d'application dites d'accompagnement de l'action de base Q_1 , y compris s'il y a lieu les charges climatiques et celles dues aux instabilités.

Toutefois, cette justification n'est pas à effectuer si :

- $(R1) \geq 0,63 (S2)$, dans le cas d'un élément principal, dont la rupture est susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (poutre porteuse, par exemple) ;
- $(R1) \geq 0,50 (S2)$, dans le cas d'un élément secondaire, dont la rupture n'est pas susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (panneau de dalles de planchers posés sur poutres, par exemple).

Avec, dans ces expressions :

R1 : capacité résistante à l'ELU, en situation fondamentale, de l'élément non renforcé.

S2 : sollicitation agissante à l'ELU, en situation fondamentale, sur l'élément renforcé.

2.312 Renforcement vis-à-vis du moment de flexion

Les justifications à effectuer, vis-à-vis du moment de flexion, pour les éléments en béton renforcés par le système C-Laminate S&P, sont les suivantes :

Calcul à l'ELS : ce calcul est effectué selon les hypothèses classiques du béton armé, en tenant compte de l'historique du chargement et du renforcement (y compris un éventuel déchargement ou vérinage provisoire en cours de travaux). Ceci conduit à superposer les états de contraintes relatifs aux deux situations suivantes :

- Ouvrage non renforcé, soumis aux sollicitations initiales, appliquées au moment où l'on entame les travaux de renforcement ;
- Ouvrage renforcé, soumis aux sollicitations additionnelles.

Cette justification est menée en prenant en compte, sur les contraintes à rupture, les coefficients de sécurité donnés au paragraphe §4 du Dossier Technique établi par le demandeur.

Pour cette justification, il y a lieu de limiter la contrainte finale dans les armatures tendues existantes à la valeur $f_{slim}=0,80 f_{yk}$ sous combinaison caractéristique.

La contrainte de compression dans le béton est limitée à $0,6 f_{ck}$ sous combinaison caractéristique et à $0,45 f_{ck}$ sous combinaison quasi-permanente (AFGC Février 2011 §2.4.3).

- Dans le cas où le renfort composite n'est pas appliqué sur la totalité de la partie de la structure fissurée (risque de pénétration des agents agressifs), il y a lieu de justifier la maîtrise de la fissuration conformément au paragraphe 7.3 de la norme NF EN 1992-1-1 et son Annexe Nationale.

Calcul à l'ELU : ce calcul est mené conformément aux détails donnés dans le dossier technique établi par le demandeur. En plus des hypothèses classiques sur le béton et l'acier, les déformations des renforts C-Laminate S&P est limitée conformément aux indications données au paragraphe « Dimensionnement » du dossier technique établi par le demandeur.

Vérification du glissement à l'interface composite-béton : cette vérification consiste à s'assurer que la contrainte de cisaillement à l'interface composite-béton n'excède pas la valeur de la contrainte limite de cisaillement. Cette valeur limite s'appuie dans tous les cas sur des essais de pastillage à effectuer in situ sur le support après préparation, ragréage le cas échéant, dans l'état dans lequel il est destiné à recevoir le renforcement.

La valeur de la contrainte de cisaillement limite à retenir pour le dimensionnement est calculée de la manière suivante, à partir de la résistance caractéristique f_{tk} obtenue par les essais de pastillage

A l'ELS:	$\bar{\tau} = \min(1,5 MPa; f_{tk}/2)$
A l'ELU (fondamental et accidentel) :	$\bar{\tau}_r = \min(2 MPa; f_{tk}/1,5)$

(Dans tous les cas, le procédé n'est pas applicable si les essais de pastillage donnent une valeur de f_{tk} inférieure à 1,5 MPa.) :

2.313 Renforcement des éléments en béton précontraint

Le dimensionnement du renforcement des éléments en béton précontraint doit être effectué conformément au paragraphe §4.5 du Dossier Technique établi par le demandeur. Les principes de justifications sont identiques à ceux développés dans le cas du béton armé sauf en ce qui concerne les états limites de service en flexion :

Pour la justification à l'état limite de service, il y a lieu de limiter la contrainte de traction à $0,8 f_{pk}$ dans les armatures de précontrainte (cas de la précontrainte adhérente) sous combinaison caractéristique.

Dans tous les cas, il convient de s'assurer que, pour le renforcement en flexion des éléments en béton précontraint, la section d'enrobage soit complètement comprimée sous les combinaisons quasi-permanentes.

2.32 Conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans le dossier technique établi par le demandeur, notamment pour ce qui concerne le nettoyage et la préparation des supports ainsi que la réalisation des essais de convenances sur ce même support. Il est précisé que ces essais doivent être effectués pour chaque chantier et pour tous les supports visés par le présent Avis Technique.

L'entreprise mettant en œuvre le procédé doit justifier d'une formation spécifique à ce type de renforcement. Le cahier de charges fourni par le Titulaire lors de la formation des entreprises applicatrices doit intégrer l'ensemble des essais et contrôles prescrits dans le présent document.

Conclusions

Appréciation globale

L'utilisation du procédé dans le domaine d'emploi accepté (cf. paragraphe 2.1) est appréciée favorablement.

Validité

À compter de la date de publication présente en première page et jusqu'au 30/04/2024

*Pour le Groupe Spécialisé n°3.3
Le Président*

3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

Il est souligné que le renforcement structural d'un ouvrage existant quelle que soit la technique de renforcement utilisée, doit faire suite à un diagnostic préalable de qualification de cet ouvrage (détermination des capacités résistantes). Un tel diagnostic peut se révéler lourd et imprécis, étant notamment fonction de la qualité des matériaux, des dispositions internes souvent non accessibles (armatures, par exemple) et d'une manière générale de « l'histoire » de l'ouvrage. L'attention du Maître d'œuvre est donc attirée sur la nécessité qu'il y a à faire effectuer un diagnostic aussi précis que possible, permettant de dimensionner et de mettre en œuvre les renforcements de manière pertinente.

L'attention est attirée sur le fait que les Règles AFGC relatives aux éléments renforcés par composites fixent une température minimale de service continu de -20°C.

De plus, il est précisé que les entreprises spécialisées dans la mise en œuvre du procédé doivent fournir, pour chaque chantier, les fiches d'auto-contrôle données dans le Dossier Technique, dûment complétées, notamment pour ce qui concerne les conditions de réticulation qui sont fondamentales pour le bon fonctionnement du procédé.

*Le Rapporteur du Groupe Spécialisé
n° 3.3*

Dossier Technique

établi par le demandeur

A. Description

1. Principe

Le procédé S&P C-Laminate est un système de renfort structural d'éléments en béton armé et béton précontraint. Les lamelles S&P C-Laminate sont des lames de différentes sections composées de fibres de carbone pultrudées, surtout utilisées pour les renforts à la flexion.

Tous les éléments sont fabriqués en usine à l'aide de fibres de carbone de qualité aéronautique.

- Les lamelles S&P C-Laminate sont des lames de différentes sections ; composées de fibres de carbone pultrudées dans une résine époxy, surtout utilisées pour les renforts à la flexion.

Le logiciel d'aide au calcul FRP lamella fait partie intégrante du système S&P C-Laminate, et est un des outils performants pour les bureaux d'études chargés du dimensionnement.

Les S&P C-Sheet peuvent être associés aux S&P C-Laminate qui font l'objet d'un Avis Technique en cours de validité.

2. Domaines d'emploi

Le procédé S&P C-Laminate permet le renforcement structural d'éléments en béton armé et béton précontraint par collage de pièces en carbone dans ou en surface de la structure en cas d'augmentation des charges d'exploitation de l'ouvrage ou de malfaçon (ferraillage insuffisant, mal positionné).

- Les Lamelles S&P C-Laminate collées en surface (intrados ou extradoss) ou gravées dans des fentes de la fibre tendue permettent un renfort à la flexion.

Exemples d'application :

- Renforcement de poutres et planchers de bâtiments d'habitations ;
- Renfort de trémies ;
- Renfort de radier.

Les domaines d'emplois principaux sont :

- La réparation de structures dégradées, pour la restitution de la résistance initiale.
- Le renforcement de structures, pour l'obtention d'une résistance supérieure à la résistance initiale.
- Une mise en conformité des ouvrages de bâtiment, génie civil, industriels ... en cas de changement de destination.

2.1 Types de charges

L'utilisation du système est autorisée pour les charges statiques.

2.2 Zones géographiques d'utilisation

L'utilisation du système est autorisée en France métropolitaine.

2.3 Durabilité

La durabilité des éléments renforcés est normalement assurée, exception faite pour les utilisations en locaux (ou ambiances) suivantes :

- Atmosphère chimiquement agressive. Les conditions en bord de mer (sel, humidité, ...) ne sont pas considérées comme agressives.
- Lorsque la température est susceptible de dépasser les valeurs suivantes :
 - S&P RESIN 220 : 47°C en pointe et 37°C en continu ;
 - S&P Resin 220 HP : 52°C en pointe et 40°C en continu ;
 - S&P RESIN 55 et S&P Resicem : 44 °C en pointe et 34°C en continu ;
 - S&P Resin 55 HP et S&P Resicem HP : 48°C en pointe et 37°C en continu.
- La température en pointe correspond à la température dont l'application est inférieure à 24h.

3. Description des matériaux

3.1 Lamelles S&P C-Laminate

Les lamelles S&P C-Laminate sont disponibles en deux modules d'élasticité type SM (Standard Modulus) et type HM (High Modulus). Le

choix sera défini en fonction des résultats des calculs. La qualité SM est la plus couramment utilisée.

Identification et marquage

Exemple de désignation : S&P C-Laminate SM 80/1.4
SM Référence du type de la lamelle
1,4 Épaisseur en millimètre de la lamelle
80 Largeur en millimètre de la lamelle

Un marquage est imprimé le long de la lamelle.

Le numéro de lot et la désignation sont apposés régulièrement sur chaque couronne.

Contrôle : Chaque lot (bobines d'environ 3km) fait l'objet de plusieurs contrôles (un contrôle environ tous les 600m) du module d'élasticité. Un échantillonnage est testé à la rupture en traction.

S&P produisant ses lamelles dans sa propre usine elles peuvent être obtenues, sur commande, dans d'autres sections avec les mêmes caractéristiques.

- Couleur : noir ;
- Taux de fibre : min. 68% ;
- Résistance à la traction transversale des lamelles : 25 MPa ;
- Transition vitreuse de la matrice >100°C.

Lamelles collées :

Type de lamelles	Largeur	Épaisseur	Section
S&P C-Laminate SM	[mm]	[mm]	[mm ²]
50 / 1.2	50	1,2	60
50 / 1.4	50	1,4	70
60 / 1.4	60	1,4	84
80 / 1.2	80	1,2	96
80 / 1.4	80	1,4	112
90 / 1.4	90	1,4	126
100 / 1.2	100	1,2	120
100 / 1.4	100	1,4	140
120 / 1.2	120	1,2	144
120 / 1.4	120	1,4	168
150 / 1.2	150	1,2	180
150 / 1.4	150	1,4	210
S&P C-Laminate HM			[mm ²]
50 / 1.4	50	1,4	70
60 / 1.4	60	1,4	84
80 / 1.4	80	1,4	112
90 / 1.4	90	1,4	126
100 / 1.4	100	1,4	140
120 / 1.4	120	1,4	168

Lamelles engravées :

Types de lamelles	Largeur	Épaisseur	Section
S&P C-Laminate SM	[mm]	[mm]	[mm ²]
10 / 1.4	10	1,4	14
20 / 1.4	20	1,4	28
10 / 2.8	10	2,8	28
S&P C-Laminate HM	[mm]	[mm]	[mm ²]
10 / 1.4 *	10	1,4	14
20 / 1.4 *	20	1,4	28

* Uniquement sur commande spéciale.

3.2 S&P Resin 220 et S&P Resin 220 HP - Colle pour lamelles S&P C-Laminate

Colles époxy bi-composant pour le collage des lamelles S&P C-Laminate sur le support ou engravées dans des supports horizontaux et verticaux (NF EN 1504-4). Peut également être utilisé pour des reprofilages jusqu'à 5mm d'épaisseur.

Caractéristique	S&P Resin 220	S&P Resin 220 HP
Masse volumique	~ 1,75 kg/l	~ 1,60 kg/l
Délai de durcissement total	~ 3 jours	~ 7 jours
Épaisseur d'application	1 à 3 mm	
Température d'application	+8 °C à +35 °C	
Résistance à la traction sur béton	> 3,0 N/mm ² (rupture dans le béton)	
Humidité du support à l'application	< 4 %	
Résistance à la traction sur acier	≥ 14 MPa	≥ 15 MPa
DPU	~ 60 min.	~ 90 min.

Valeurs à 20° C et 65 % d'humidité relative

3.3 S&P Resin 55 et S&P Resin 55 HP - Colles pour lamelles engravées

Colles époxy bi-composant pour l'application des lamelles S&P C-Laminate engravées sur un support horizontal.

Caractéristique	S&P Resin 55	S&P Resin 55 HP
Masse volumique	~ 1,11 kg/l	~ 1,15 kg/l
Délai de durcissement total	~ 7 jours	
Épaisseur d'application	voir consommations ci-après	
Température d'application	+8 °C à +35 °C	
Résistance à la traction sur béton	> 2,5 N/mm ² (rupture dans le béton)	> 3,0 N/mm ² (rupture dans le béton)
Humidité du support à l'application	< 4 %	
Résistance à la traction sur acier	≥ 15 MPa	
DPU	~ 45 min.	

Valeurs à 20° C et 65 % d'humidité relative

3.4 Consommations

S&P C-Laminate collées

Consommation avec lamelles collées, selon la rugosité du support de béton (valeurs usuelles pour une épaisseur de 3mm).

Largeur de lamelle	Consommation de S&P Resin 220	Consommation de S&P Resin 220 HP
50 mm	~ 265 g/ml	~ 240 g/ml
60 mm	~ 315 g/ml	~ 290 g/ml
80 mm	~ 420 g/ml	~ 385 g/ml
90 mm	~ 475 g/ml	~ 435 g/ml
100 mm	~ 530 g/ml	~ 480 g/ml
120 mm	~ 630 g/ml	~ 580 g/ml
150 mm	~ 800 g/ml	~ 720 g/ml

S&P C-Laminate engravées

Consommation avec lamelles engravées (valeurs usuelles).

Largeur de lamelle	Consommation de S&P RESIN 220	Consommation de S&P RESIN 55
10/1.4 mm	~ 120 g/ml	~ 80 g/ml
10/2.8 mm	~ 160 g/ml	~ 110 g/ml
15/2.5 mm	~ 200 g/ml	~ 130 g/ml
20/1.4 mm	~ 200 g/ml	~ 130 g/ml

3.5 S&P Resin 230 et S&P Resin 230 HP - Mortiers de reprofilage des supports

Mortier époxy tri-composant utilisé pour reprofiler le support avant application des lamelles S&P C-Laminate.

Caractéristique	S&P Resin 230	S&P Resin 230 HP
Masse volumique	~ 1,90 kg/l	~ 2,05 kg/l
Délai de durcissement total	~ 7 jours	~ 7 jours
Épaisseur d'application	50 mm par couche	
Température d'application	+8 °C à +35 °C	
Résistance à la traction sur béton	> 2,5 N/mm ² (rupture dans le béton)	> 3,0 N/mm ² (rupture dans le béton)
Humidité du support à l'application	< 4 %	
DPU	~ 60 min.	~ 90 min.

Valeurs à 20° C et 65 % d'humidité relative

4. Dimensionnement

4.1 Introduction

Le dimensionnement du renforcement doit être réalisé par un bureau d'étude de structure. S&P met à disposition des calculateurs des logiciels de dimensionnement développés en interne et utilisés depuis 2000 en Europe. La responsabilité des résultats fournis par les logiciels et donc de la structure des logiciels reviennent au titulaire. Toutefois, le bureau d'étude structure utilisateur du logiciel reste responsable de la bonne utilisation des logiciels suivant le cahier des charges fourni, de la définition des hypothèses et des données d'entrée ainsi que de l'interprétation des résultats.

Le présent avis technique est réalisé conformément aux Eurocodes et aux règles AFGC 2011 car ce sont les normes actuelles. Toutefois nous offrons la possibilité de dimensionner selon les BAEL et BPEL 91 révisés 99 en se conformant à l'annexe 4 du présent avis technique.

4.2 Comportement du renfort FRP

4.2.1 Notations

Matériau FRP

E_{fu}	Module d'élasticité moyen du matériau FRP
E_{fk}	Module d'élasticité caractéristique du matériau FRP (valeur fractile 5%)
ϵ_{fu}	Allongement moyen à la rupture du matériau FRP
ϵ_{fk}	Allongement caractéristique à la rupture du matériau FRP (fractile 5%)
f_{fu} FRP	Résistance moyenne à la rupture en traction du matériau FRP
f_{fk}	Résistance caractéristique à la rupture en traction du matériau FRP (fractile 5%)
n_f	Nombre de couches superposées de FRP
m_f	Nombre de bandes juxtaposées de FRP
s_f	Entraxe des bandes de FRP
A_f	Section de l'armature FRP
t_f	Épaisseur de l'armature FRP
b_f	Largeur de l'armature FRP
a_r	Distance entre axe des lamelles et bord libre de l'élément
t_s	Profondeur de la rainure dans le béton
b_s	Largeur de la rainure dans le béton
$\sigma_{f,ELS}$	Contrainte de dimensionnement à l'ELS du matériau FRP
$\sigma_{f,ELU}$	Contrainte de dimensionnement à l'ELU du matériau FRP
$\epsilon_{f,ELS}$	Allongement de dimensionnement à l'ELS du matériau FRP
$\epsilon_{f,ELU}$	Allongement de dimensionnement à l'ELU du matériau FRP
$R_{fd,ELS}$	Résistance de dimensionnement à l'ELS du matériau FRP
$R_{fd,ELU}$	Résistance de dimensionnement à l'ELU du matériau FRP

Renfort à la flexion

M_{Ek0}	Moment caractéristique lors du renfort
N_p	Force de précontrainte caractéristique
M_{p0}	Part isostatique du moment de précontrainte caractéristique
M_p'	Part du moment de précontrainte dû à l'hyperstaticité de l'élément
M_{Edf}	Moment de dimensionnement de l'état renforcé
M_{Ekf}	Moment caractéristique de l'état renforcé
M_{Rdf}	Moment de dimensionnement admissible de la section renforcée
M_{Rd0}	Moment de dimensionnement admissible de la section non renforcée
M_{Re0}	Moment admissible de la section non renforcée (combinaison accidentelle)
η_M	Degré de renforcement à la flexion
γ_{Me}	Sécurité globale restante lors de la défaillance du renfort FRP

Ancrage

f_{csm}	Résistance à la traction superficielle du béton (moyenne)
$f_{ck,cube}$	Résistance à la compression du béton sur cube (valeur caractéristique)
γ_c	Coefficient de sécurité du béton
$F_{rd,E}$	Force de traction du renfort FRP au point E
l_b	Longueur d'ancrage du renfort FRP
F_{bd}	Valeur de dimensionnement de la force de rupture de l'adhérence
$F_{bd,max}$	Valeur de dimensionnement de la force maximale de rupture de l'adhérence
$l_{b,max}$	Longueur d'ancrage correspondante à la force maximale de rupture de l'adhérence
$\tau_{k,k}$	Valeur caractéristique de la résistance au cisaillement de la colle époxy

γ_b	Coefficient de sécurité de la colle époxy
x_E	Distance entre le point E et l'axe théorique de l'appui
a_i	Distance entre l'axe théorique de l'appui et l'arête du bord de l'appui
f	Distance entre l'extrémité du renfort FRP et l'arête du bord de l'appui
a_L	Décalage horizontal de la ligne de force de traction selon Lois de comportement et caractéristiques des matériaux FRP

4.2.2 Caractéristiques des lamelles S&P C-Laminate

Les contraintes et déformations à prendre en compte dans les calculs suivant les recommandations de l'AFGC 2011 sont celles indiquées dans les tableaux ci-dessous.

Dans les tableaux ci-dessous les valeurs à prendre pour le dimensionnement sont en gras.

Lamelles collées en surface et lamelle engravées			S&P C-Laminate	
			SM	HM
Contrainte de rupture (Valeur moyenne)	f_{fu}	[MPa]	≥ 2 800	≥ 2 800
Contrainte de rupture (fractile 5%)	f_{fk}	[MPa]	≥ 2 700	≥ 2 700
Allongement à la rupture (valeur moyenne)	ϵ_{fu}	[%o]	≥ 16,0	≥ 13,5
Module d'élasticité (valeur de calcul)	E_{fu}	[MPa]	≥170000	≥205000
Module d'élasticité (fractile 5%)	E_{fk}	[MPa]	≥168000	≥201000
Contrainte de dimensionnement à l'ELS (AFGC 2.2.3)	$\sigma_{f,ELS}$	[MPa]	1 300	1 300
Contrainte de dimensionnement à l'ELU (AFGC §2.2.3)	$\sigma_{f,ELU}$	[MPa]	1 445	1 450
Allongement de dimensionnement à l'ELS	$\epsilon_{f,ELS}$	[%o]	7,64	6,34
Allongement de dimensionnement à l'ELU	$\epsilon_{f,ELU}$	[%o]	8,50	7,07

Exemple de dimensionnement pour une lamelle type C-Laminate SM, dimension 100/1.2mm :

-Dimensionnement à l'ELS :

$$R_{fd,ELS} = 1'300 \text{ MPa} \times 100\text{mm} \times 1.2\text{mm} = 156 \text{ kN}$$

-Dimensionnement à l'ELU :

$$R_{fd,ELU} = 1'445 \text{ MPa} \times 100\text{mm} \times 1.2\text{mm} = 173.4 \text{ kN}$$

Adhérence S&P C-Laminate – Support pour les lamelles collées en surface

La force de rupture de l'adhérence F_{bd} des lamelles S&P C-Laminate n'augmente plus à partir d'une certaine longueur d'ancrage $l_{b,max}$. La force de rupture de l'adhérence maximale $F_{bd,max}$ peut être déterminée à l'aide des propriétés des matériaux FRP et de la résistance à la traction superficielle du support.

$$F_{bd,max} = 0,225 * m_f * b_f * \sqrt{E_f * n_f * t_f * \sqrt{f_{c,sd} * f_{c,d,cube}}} [N/mm^2] \quad (1)$$

$$\text{Avec } f_{c,sd} = \frac{f_{csm}}{\gamma_c} [N/mm^2] \text{ et } f_{c,d,cube} = \frac{f_{ck,cube}}{\gamma_c} [N/mm^2] \quad (2)$$

La force de traction f_{csm} est déterminée par essais d'adhérence par traction directe. Elle est de :

Minimum pour les lamelles : 1.50 N/mm²

Maximum lamelles : 3.00 N/mm²

La longueur d'ancrage correspondante $l_{b,max}$ peut être déterminée par la relation suivante

$$l_{b,max} = 1,46 * \sqrt{\frac{E_f * n_f * t_f}{\sqrt{f_{csm} * f_{ck,cube}}}} [mm] \quad (3)$$

La force de rupture de l'adhérence F_{bd} correspondant à une longueur d'ancrage $l_b \leq l_{b,max}$ est de :

$$F_{bd} = F_{bd,max} * \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}}\right) [N/mm^2] \quad (4)$$

4.3 Adhérence S&P C-Laminate - Support – pour les lamelles engravées

Au contraire des lamelles collées superficiellement, les lamelles engravées dans des rainures peuvent être utilisées jusqu'à la résistance à la traction du matériau. On peut décrire la force de traction reprise par l'adhérence de la lamelle F_{bd} en fonction de la longueur d'ancrage l_b :

$$F_{bd} = m_f \cdot b_f \cdot \tau_{K,d} \cdot \sqrt{a_r} \cdot l_b \cdot (0,4 - 0,0015 l_b) \cdot 0,95 \quad \text{pour } l_b \leq 115 [\text{mm}] \quad (5)$$

$$F_{bd} = m_f \cdot b_f \cdot \tau_{K,d} \cdot \sqrt{a_r} \cdot \left(26,2 + 0,065 \cdot \tanh\left(\frac{a_r}{70}\right) \cdot (l_b - 115) \right) \cdot 0,95 \quad \text{pour } l_b > 115 [\text{mm}] \quad (6)$$

avec $\tau_{K,d} = \tau_{K,k}^* / \gamma_b$ et $\gamma_b = 1,3$

*Les valeurs de $\tau_{K,k}$ pour les différentes résines peuvent être obtenues chez S&P Reinforcement France.

4.4 Hypothèses de calcul

Les calculs sont menés conformément à l'Eurocode 2 en appliquant les règles mécaniques connues du dimensionnement classique du béton armé. En conformité avec les Eurocodes, le calcul au coefficient d'équivalence n'est pas retenu :

- Pour le dimensionnement en flexion on admet que les sections droites restent planes après déformation (hypothèse de Bernoulli).
- Une contribution de la résistance à la traction du béton n'entre pas en considération. Toutes les forces de traction nécessaires à l'équilibre interne sont reprises par l'armature interne et par le renfort FRP.
- Pour les éléments précontraints on peut prendre en compte la résistance à la traction du béton.
- On admet la collaboration complète de l'armature existante et du renfort FRP dans le cadre des limites d'allongement.
- On admet une connexion totalement rigide. Tous les éléments de la section, à l'exception des câbles de précontrainte non injectés, qui se trouvent dans des fibres situées à égale distance de la fibre neutre subissent le même allongement. Soit une collaboration complète de l'armature existante et du renfort FRP dans le cadre des limites d'allongement.

Les combinaisons des charges, le comportement des matériaux aciers et béton et les coefficients de sécurité sont donnés par l'Eurocode 2. La vérification à l'état limite ultime se base sur une comparaison de la valeur de dimensionnement d'une sollicitation avec la valeur de dimensionnement de la capacité portante de la section selon la condition suivante :

$$E_{df} \leq R_{df} \quad (7)$$

La détermination de la section de FRP nécessaire respective du moment de flexion admissible avant et après le renforcement s'effectue par calcul itératif de l'équilibre des forces internes.

4.5 Renforcement en flexion du béton armé et précontraint

4.51 Principe

La détermination de la capacité portante flexionnelle de la section non renforcée M_{Rd0} et de l'état d'allongement initial ϵ_0 ainsi que le calcul de la section FRP nécessaire A_f , min et de la capacité portante flexionnelle pour l'état renforcé M_{Rdf} s'effectuent sur la base des conditions d'équilibre $\Sigma H = 0$ et $\Sigma M = 0$ en tenant compte des lois des matériaux.

Forces internes

$$\text{Acier} \quad F_s = E_s \cdot A_s \cdot \epsilon_s \leq A_s \cdot f_{yk} / \gamma_s \quad (8)$$

$$\text{FRP} \quad F_f = E_{fk} \cdot A_f \cdot \epsilon_f \quad \text{avec} \quad \epsilon_f \leq \epsilon_{f,ELU}; \epsilon_{f,ELS} \quad (9)$$

$$\text{Béton} \quad F_c = b \cdot \alpha_R \cdot x \cdot \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c \quad (10)$$

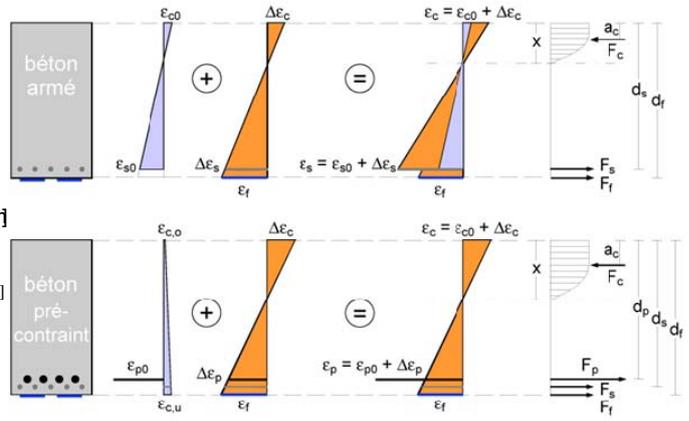
(α_R : paramètre de la courbe parab.)

Conditions d'équilibre

$$\Sigma H = 0 \quad F_c - F_s - F_p - F_f = 0 \quad (11)$$

$$\Sigma M = 0 \quad F_c \cdot a_c - F_s \cdot d_s - F_p \cdot d_p - F_f \cdot d_f = 0 \quad (12)$$

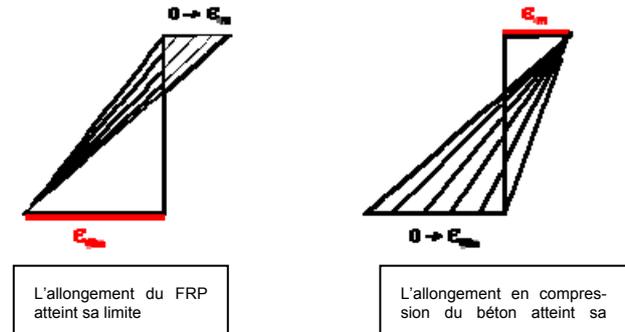
La résolution des conditions d'équilibre s'effectue itérativement en variant les allongements dans la zone comprimée et la zone tendue. Les conditions d'équilibre sont contrôlées en passant les différents états d'allongement.



On détermine d'abord la répartition des allongements de l'état d'allongement initial. Après, pour la section renforcée, on cherche par itération un état d'allongement pour lequel les forces internes et externes de l'élément en béton armé ou précontraint sont en équilibre. Lors du calcul on superpose l'état d'allongement dû à l'allongement initial à celui dû à la sollicitation supplémentaire de l'état renforcé.

4.52 État limite ultime

À l'état limite ultime, les matériaux doivent respecter leur allongement limite. En règle générale l'état limite ultime est déterminé par l'allongement limite du système FRP. Si au contraire la zone comprimée du béton est très fortement exploitée, un renfort FRP n'est souvent pas judicieux.



Pour les systèmes FRP collés en surface, la capacité portante calculée de l'élément renforcé ne doit pas être plus grande que deux fois celle de l'élément non renforcé. Cela s'exprime par le degré de renforcement à la flexion, défini comme suit :

- dans le cas d'un élément principal, dont la rupture est susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (poutre porteuse, par exemple) :

$$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 1/0.63 \quad (13)$$

- dans le cas d'un élément secondaire, dont la rupture n'est pas susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (panneaux de dalles de planchers posés sur poutres, par exemple) :

$$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 1/0.5 \quad (14)$$

4.53 État de service

À l'état de service en flexion, l'armature interne ne doit pas dépasser la limite élastique. D'autre part les contraintes à l'état de service aussi bien pour le béton et les aciers que pour la section de composite FRP choisie sont déterminées et comparées aux limites données par l'Eurocode 2 et le chapitre 2.4.3 de l'AFGC 2011.

- Contrainte dans l'acier : $\sigma_{lim} = 0,80 f_{yk}$ sous combinaison caractéristique.
- Contrainte dans le béton : $\sigma_{lim} = 0,60 f_{ck}$ sous combinaison caractéristique
- Contrainte dans le béton : $\sigma_{lim} = 0,45 f_{ck}$ sous combinaison quasi-permanente.
- Contrainte dans le composite : $\sigma_{lim} = \min(0,9 \sigma_{lim}, \sigma_{f,ELS})$ avec σ_{lim} la limite de la contrainte de traction des aciers.
- Contrainte dans les armatures de précontrainte : $\sigma_{lim} = 0,8 f_{pk}$ (cas de la précontrainte adhérente) sous combinaison caractéristique

4.54 Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP

La vérification de l'ancrage est effectuée pour l'état limite ultime en tenant compte des facteurs de sécurité partiels des sollicitations et des matériaux. On effectue la vérification au point final E de la longueur d'ancrage l_b du renfort FRP. Dans le cadre de la couverture de la force de traction, il faut vérifier que la valeur de dimensionnement de la force de traction FRP F_{fd} existante au point E est plus petite que la force de rupture de l'adhérence F_{bd} ancrable sur la longueur l_b du système FRP choisi.

$$Poutres \quad F_{bd} \geq F_{fd} \quad (15)$$

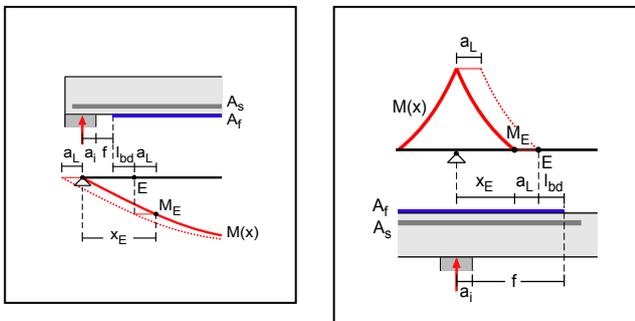
La force de traction FRP de calcul F_{fd} est déterminée par une itération de l'équilibre à partir du moment donné. F_{bd} est la valeur de dimensionnement de la force de rupture de l'adhérence au point E. Elle se calcule à partir des caractéristiques des sections FRP choisies et de la résistance respective du béton et de la colle.

Systèmes FRP collés en surface

Pour la vérification d'un appui de bord le point E est dessiné dans le graphique. La distance x_E entre le point E et l'axe de l'appui est calculée comme suit :

$$x_E = a_i + f + l_{bd} + a_L \quad \text{avec} \quad f \leq 5 \text{ cm} \quad (16)$$

Lors de la vérification d'un appui en supérieur le point E correspond au point de moment nul. Cette vérification n'est pas nécessaire pour les renforcements locaux (par exemple les trémiés).



Lamelles engravées

Au contraire des systèmes FRP collés en surface, les lamelles S&P C-Laminate engravées peuvent être ancrées à partir du point où, selon le calcul, elles ne sont plus nécessaires pour couvrir la force de traction. Il s'agit de l'endroit auquel le moment agissant atteint la capacité portante flexionnelle M_{Rd0} de la section non renforcée. Le point E pour lequel la vérification de l'ancrage est effectuée est déterminé par la condition $M_E = M_{Rd0}$.

4.55 Éléments en béton précontraint

Pour les éléments précontraints il faut indiquer la précontrainte des aciers en tenant compte de toutes les pertes ($t = \infty$). La force de précontrainte résultante et la part isostatique du moment de précontrainte M_{p0} sont déterminées. Ces valeurs se rapportent à la section, à la précontrainte et à la hauteur utile de l'armature précontrainte.

Le logiciel ne prend en compte que la part du moment de précontrainte isostatique. Si l'élément précontraint est hyperstatique, il faut ajouter la part du moment hyperstatique de précontrainte $M_{p'}$ aux moments dus aux charges ME_{K0} , ME_{Df} et ME_{Kf} .

Comme les éléments en béton précontraint sont en règle générale non fissurés dans la zone proche de l'appui, l'armature FRP collée doit toujours être ancrée en arrière de la dernière fissure de flexion. Alors la section pour la vérification de l'ancrage d'extrémité FRP se trouve au point où le moment sollicitant correspond au moment de fissuration de la section précontrainte.

Le point E pour lequel la vérification de l'ancrage est effectuée correspond dans ce cas à l'endroit auquel le moment agissant M_E atteint le moment de fissuration M_{cr} de la section.

4.56 Règles constructives

Lamelles S&P C-Laminate collées en surface

Distance au bord :	$a_{r,min} = c_w$	(17)
Entraxe en fonction de la portée	$s_{r,max} = 0,2 \cdot l$	(18)
Entraxe en fonction du porte-à-faux	$s_{r,max} = 0,4 \cdot l$	(19)
Entraxe en fonction de l'ép. de la dalle	$s_{r,max} = 5 \cdot h$	(20)
Nombre de couches de S&P C-Laminate	$n_{r,max} = 2$	(21)

Lamelles S&P C-Laminate engravées

Rainure :	$t_{s,max} = c_w - 5$ [mm]	(22)
Rainure :	$b_{s,min} = t_f + 1$ [mm]	(23)
Rainure :	$b_{s,max} = t_f + 3$ [mm]	(24)
Distance au bord :	$a_{r,min} = \min(2b_f ; d_k)$	(25)
Entraxe :	$s_{r,min} = d_k$ ou b_f (si $a_s \geq 2d_s$)	(26)
Entraxe en fonction de la portée :	$s_{r,max} = 0,2 \cdot l$	(27)
Entraxe en fonction du porte-à-faux :	$s_{r,max} = 0,4 \cdot l$	(28)
Entraxe en fonction de l'ép. de la dalle :	$s_{r,max} = 4 \cdot h$	(29)

Dans les équations (17) à (29) on a :

c_w	enrobage de béton des armatures d'effort tranchant
a_r	distance entre axe des lamelles et bord libre de l'élément
s_r	entraxe entre les lamelles
n_r	nombre de couche de lamelle
t_s	profondeur de la rainure dans le béton
b_s	largeur de la rainure dans le béton
t_f	épaisseur de l'armature FRP
b_f	largeur de l'armature FRP
d_k	diamètre du plus gros grain du béton
l	portée ou porte à faux de l'élément renforcé

5. Préparation et contrôles

5.1 Détermination de la résistance à la traction du support

5.1.1 Cohésion du support

La cohésion interne du béton est déterminante pour le choix du système de renforcement.

La valeur minimale de résistance à la traction du support β_t selon EN 1542 pour les lamelles S&P C-Laminate est : $> 1.5 \text{ N/mm}^2$.

Sur la surface de béton soigneusement préparée, on déterminera la résistance à la traction du béton en trois endroits au moins. La zone d'arrachement est délimitée par une saignée d'au moins 5 mm réalisée par sciage ou par carottage.

La valeur moyenne β_t établie sur la base de 3 essais au minimum ne doit pas être inférieure à la valeur $\beta_t > 1.5 \text{ N/mm}^2$.

5.1.2 Primaire

Si le support présente de faibles valeurs d'adhérence de traction, celles-ci seront améliorées moyennant application préalable d'un primaire.

5.2 Planéité de la surface de béton préparée

Les inégalités de la surface de béton seront reprofilées en fonction des épaisseurs avec les produits S&P TECNOGOUT-FIB ou S&P TECNOGOUT- K ou S&P Resin 230 ou S&P Resin 230 HP ou S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP ou des mortiers de réparation conforme à la norme NF EN 1504-3 et garantissant des valeurs mécaniques conformes aux minimas demandés dans ce document.

Le système ne doit pas être collé sur des supports irréguliers, ce qui pourrait entraîner des poussées au vide indésirables.

Irrégularité concave : le passage d'une règle métallique de 2 mètres de longueur ne doit laisser subsister aucune inégalité de plus de 5 mm. Des inégalités $< 1 \text{ mm}$ sont admissibles sous une règle de 30 cm.

Irrégularité convexe : Les irrégularités convexes n'entraînent pas de poussée au vide. Elles n'ont donc pas besoin d'être traitées.

Avant de procéder aux opérations de collage on vérifiera la température de l'air, l'humidité relative de l'air, le point de rosée, la température du béton, la température des éléments FRP S&P et l'humidité du béton.

Les fissures existantes seront traitées avec de la résine d'injection conforme à la NF EN 1504-5.

5.3 Réalisation des engravures

Les engravures dans le béton sont réalisées par sciage. L'enrobage et la position des aciers doivent être vérifiés au préalable pour éviter leur endommagement. Si le lit supérieur est parallèle au sens des lamelles engravées il peut être envisagé de positionner les lamelles engravées entre les aciers existants.

5.4 Détermination du point de rosée

Pour déterminer la température du point de rosée, il convient de mesurer l'humidité relative de l'air ainsi que la température de l'air. Pour évaluer le risque de formation d'eau de condensation, la température du point de rosée sera comparée à la température superficielle de

l'élément de construction, celle-ci devant être au moins de 3 °C supérieure à la température du point de rosée (cf. tableau des points de rosée).

5.5 Humidité du support en béton

Le chauffage de la surface fournit un premier indice quant à la présence d'humidité perturbatrice. En séchant, des surfaces humides s'éclaircissent.

Quantitativement, la teneur en humidité peut se déterminer à l'aide d'un appareil CM: des morceaux de béton sont fragmentés dans un mortier, tamisés et pesés.

La pesée est introduite dans un flacon à pression avec une quantité bien déterminée de carbure de calcium (ampoule en verre de 5 mg). Après agitation, les billes d'acier introduites en plus dans le flacon cassent l'ampoule en verre. Le mélange des fragments de béton et du carbure de calcium provoque une réaction chimique entre l'eau contenue dans les fragments et le carbure de calcium pour former de l'acétylène. La pression de gaz résultante dépend de la teneur en humidité des fragments de béton et peut se lire sur un manomètre. La teneur en humidité subordonnée à la pression relevée sera tirée des tableaux correspondants des appareils.

Pour déterminer la teneur en humidité, on peut également procéder à un séchage en armoire à 105 °C jusqu'à ce que le poids des échantillons prélevés reste constant.

Humidité maximale du support en fonction des produits de collage.

Produit de collage	Humidité maximale du support
S&P Resin 220 / S&P Resin 220 HP	4 %
S&P Resin 230 / S&P Resin 230 HP	4 %
S&P Resin 55 / S&P Resin 55 HP	4 %

5.6 Préparation mécanique du support

La préparation mécanique peut se faire par sablage, grenailage, fraisage ou par ponçage pour les petites surfaces (collage des lamelles S&P C-Laminate par exemple), ou tout autre préparation assurant les caractéristiques minimums requises pour l'adhérence ($\beta_t > 1.5 \text{ N/mm}^2$). Un hydro sablage ou hydro décapage peut également convenir, mais dans ce cas un temps de séchage doit être observé avant la pose de la lamelle pour revenir à un taux d'humidité inférieur au maximum autorisé.

Avant collage, le support doit être parfaitement dépoussiéré.

6. Mise en Œuvre

Des guides d'applications sont disponibles sur le site internet de S&P Reinforcement France www.sp-reinforcement.fr. Toutes les étapes et les conditions de pose ainsi que les contrôles avant et après la pose y sont décrites. Ces guides d'applications ne dispensent pas l'applicateur d'avoir reçu une formation de S&P Reinforcement France.

6.1 Lamelles S&P C-Laminate collées en surface

6.11 Nettoyage / préparation des Lamelles S&P C-Laminate

Nettoyer les lamelles à l'aide d'un chiffon blanc imbibé de produit de nettoyage à base de solvant non gras. Outre les impuretés en général, on éliminera ainsi également la poussière de carbone. Le nettoyage doit s'effectuer jusqu'à ce que le chiffon blanc ne comporte plus la moindre trace noire de carbone.

6.12 Mélange de la colle S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

Produit	D.P.U. à 20° C	Humidité du support	Température d'application
S&P Resin 220	~ 60 min.	< 4 %	+8 °C à +35 °C
S&P Resin 220 HP	~ 90 min.		

6.13 Application de la colle

La lamelle en fibres de carbone soigneusement nettoyée et complètement sèche est enduite de colle époxy S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP à l'aide d'une spatule pour les petites longueurs ou à l'aide d'un appareil d'encollage spécifique « S&P Tire-colle ». La lamelle S&P C-Laminate en fibres de carbone est ensuite appliquée par simple encollage sur le support hors poussière.

6.14 Collage des Lamelles S&P C-Laminate sur le béton

La lamelle en fibres de carbone est fixée sur la surface en béton avec une légère pression de la main. Grâce à la très bonne stabilité de la colle époxy S&P Resin 220 et S&P Resin 220 HP, il n'est pas nécessaire d'utiliser des accessoires de calage. La lamelle S&P C-Laminate est ensuite marouflée de telle sorte que de la colle fraîche ressorte des deux côtés de celle-ci. On a ainsi l'assurance que la colle a été appliquée sans qu'il subsiste le moindre vide. La colle qui a débordé peut être éliminée à l'aide d'une spatule. L'épaisseur de la couche de colle sera de 2 mm en moyenne (minimum 1 mm – maximum 3 mm). D'éventuels restes de colle à la surface des lamelles peuvent être éliminés avec le produit de nettoyage à base de solvant (acétone ou MEK) tant que la colle n'a pas durci. D'autres Lamelles S&P C-Laminate peuvent être collées parallèlement en respectant un écartement minimum de 5 mm. Il est possible de superposer 2 lamelles ou de croiser des lamelles par application frais sur frais.

En cas d'application ultérieure d'un revêtement de protection sur les lamelles ; on procédera à l'application sur la lamelle d'une couche de S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP ou S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP à l'aide d'une spatule ou d'une brosse ; et frais sur frais on procédera à une projection de sable de quartz propre, sec et calibré.

6.2 Lamelles S&P C-Laminate engravées

6.21 Nettoyage / préparation des Lamelles S&P C-Laminate

Nettoyer les lamelles à l'aide d'un chiffon blanc imbibé de produit de nettoyage à base de solvant non gras. Outre les impuretés en général, on éliminera ainsi également la poussière de carbone. Le nettoyage doit s'effectuer jusqu'à ce que le chiffon blanc ne comporte plus la moindre trace noire de carbone.

6.22 Mélange de la colle S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

Produit	D.P.U. à 20° C	Humidité du support	Température d'application
S&P Resin 220	~ 60 min.	< 4 %	+8 °C à +35 °C
S&P Resin 220 HP	~ 90 min.		

6.23 Mélange de la colle S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

Produit	D.P.U. à 20° C	Humidité du support	Température d'application
S&P Resin 55	~ 45 min.	< 4 %	+8 °C à +35 °C
S&P Resin 55 HP	~ 45 min.		

6.24 Collage des Lamelles S&P C-Laminate engravées

La colle époxy est appliquée dans les rainures préalablement réalisées :

- Surfaces horizontales : S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP
- Surfaces non horizontales : S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP

La lamelle en fibres de carbone soigneusement nettoyée et complètement sèche est ensuite introduite dans la rainure et calée.

6.3 Contrôles qualité après la pose pour C-Laminate

6.3.1 Liaison S&P C-Laminate colle et béton

Il est recommandé de vérifier le degré de polymérisation de la résine par un essai de dureté Shore D.

La qualité de la liaison d'un système FRP appliqué revêt une très grande importance. La liaison peut à son tour être testée par des essais de résistance à la traction.

Il est possible de procéder à des essais de traction type SATTEC sur les lamelles S&P C-Laminate. Cela implique d'avoir appliqué des éléments supplémentaires dédiés à ces essais.

Il est également possible de prévoir des essais à la traction pour vérifier à des périodes déterminées la bonne adhérence du système FRP.

6.32 Planéité des éléments S&P C-Laminate collés

La planéité du S&P C-Laminate collées en surface sera contrôlée immédiatement après l'application. L'écart entre une surface plane et une règle 2.00m ne doit pas excéder $\Delta h = 5$ mm.

Contrôle des vides entre la colle et le support

Après collage, le FRP sera contrôlé au maillet pour détecter les vides ou par caméra thermique, thermographie en régime transitoire.

7. Revêtement des éléments de renfort

7.1 Revêtements de protection

Dans tous les cas, les revêtements de protection éventuels doivent être appliqués sur une couche de colle époxy sablée.

Les Lamelles S&P C-Laminate peuvent recevoir en finition, des revêtements destinés à un usage de protection (feu, température, mécanique...) ou à caractère esthétique.

Les lamelles S&P C-Laminate peuvent recevoir un revêtement de protection tels que : mortier époxydique, hydraulique, à base de plâtre...

7.2 Protection au feu

Les procédés de renforcement du béton, par collage de renforts (métal ou composite) ne présentent pas en l'état, de résistance particulière au feu.

Lorsque la stabilité au feu de la structure renforcée peut être justifiée selon la NF EN 1992-1-2 en prenant en compte les aciers existants, aucune disposition de protection des renforts n'est à prévoir.

(Coefficient de sécurité ≥ 1 en situation accidentelle)

Dans le cas contraire, une protection au feu devra être rapportée sur les lamelles S&P C-Laminate.

Cette protection (dont la performance et les caractéristiques selon les possibilités de mise en œuvre seront appréciées) sera justifiée, afin que la température selon la durée d'exposition spécifiée, ne dépasse pas 60°C dans le plan du collage.

La protection utilisée devra bénéficier d'un PV de résistance au feu d'un laboratoire agréé sur support identique.

En cas d'application d'un flocage appliqué directement sur les lamelles S&P C-Laminate, la surface des lamelles devra être parfaitement dégraissée et recevoir une couche de liaison (couche de S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP ou S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP sablée).

7.3 Protection à la température (en service)

Le procédé de renfort C-Laminate admet des températures au niveau du collage en service continu et en pointe telles qu'indiquées au paragraphe 2.3.

Le procédé de renfort C-Laminate sera protégé de l'exposition directe du rayonnement solaire par un revêtement.

8. Sécurité du travail

Allergies

Les résines époxy peuvent provoquer des irritations de la peau. Par conséquent, nous recommandons l'utilisation des équipements de protection individuels adaptés (EPI) conformément aux fiches de sécurité des produits.

Découpe et ponçage de S&P C-Laminate

Les poussières fines qui sont produites lors du ponçage et du sciage sont dangereuses pour la santé.

Par conséquent, nous recommandons l'utilisation des équipements de protection individuels adaptés (EPI) conformément aux fiches de sécurité des produits.

Traitement et gestion des déchets de résines époxy

Les résidus non durcis sont à évacuer en centre de recyclage adaptée.

Consulter la fiche de données de Sécurité pour l'élimination des produits et de leurs emballages ; de manière générale, consulter les Fiches Techniques des produits et leurs Fiches de Données de Sécurité avant toute application.

B. Résultats expérimentaux

- Essai de détermination du module d'élasticité en compression, Applus Laboratories, année 2016 ;
- Essai de détermination de la résistance à la compression, Applus Laboratories, année 2016 ;

- Essai de détermination de la transition vitreuse, Applus Laboratories, année 2016 ;
- Essai de détermination de l'adhérence acier sur acier, Applus Laboratories, année 2016 ;
- Essai de traction directe sur composite, S&P, année 2019 ;
- Essai de cisaillement par double recouvrement, LMC², année 2018 ;
- Essai de cisaillement interlaminaire, LMC², année 2018.

C. Références

C1. Données Environnementales et Sanitaires¹

Le procédé S&P C-Laminate ne fait pas l'objet d'une Déclaration Environnementale (DE). Il ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière. Les données issues des DE ont notamment pour objet de servir au calcul des impacts environnementaux des ouvrages dans lesquels les procédés visés sont susceptibles d'être intégrés.

C2. Autres références

C-Laminate SM

- Centre Commercial Le Merlan, Marseille, année 2018 ;
- Tour Trinity, La Défense, année 2018 ;
- Centre commercial Casino, Le Cannet, année 2018 ;
- Parking Zola, Villeurbanne, année 2018 ;
- Parking Debourg, Lyon, année 2018 ;
- Maison Viard, Ecully, année 2018 ;
- Parking Halles, Lyon, année 2018 ;
- CHU Estaing, Clermont-Ferrand, année 2018 ;
- CHU, Limoges, année 2018 ;
- Centre hospitalier, Le Mans, année 2018 ;
- Gare SNCF, L'Etang la Ville, année 2018 ;
- Syctom, Ivry sur Seine, année 2018 ;
- Cimenterie Lafarge, Bouc Bel Air, année 2018 ;
- Centre hospitalier, Périgueux, année 2018.

C-Laminate HM

- Corolles, Puteaux, année 2016 ;
- CHU Montpied, Clermont-Ferrand, année 2016 ;
- Les Lauriers, Marseille, année 2017 ;
- Résidence, Houilles, année 2017 ;
- Servier, Orléans, année 2017.

¹ Non examiné par le Groupe Spécialisé dans le cadre de cet avis.

Tableaux du Dossier Technique

Annexe 1

Essais d'adhérence suivant NF EN 1542

Projet : _____	No. de projet : _____
Adresse : _____	Date : _____
Lieu : _____	Personne compétente : _____
Elément de construction : _____	Tel. : _____

Elément : _____	Collé le : _____
Colle : _____	Température : _____ °C de l'élément
Préconditionnement : _____	
Diamètre des rondelles : 50 mm	Surface d'adhérence A_o : 1962.5 mm²

Appareil d'essai d'adhérence:

Eprouvette No.	Effort de traction F [kN]	Résistance d'adhérence f [N/mm ²]	Croquis de rupture	B:	Béton
				C:	Colle
				FRP:	S&P C-Laminate, etc.
1			 Rupture: _____		
2			 Rupture: _____		
3			 Rupture: _____		
4			 Rupture: _____		
5			 Rupture: _____		
6			 Rupture: _____		
7			 Rupture: _____		
8			 Rupture: _____		
9			 Rupture: _____		
10			 Rupture: _____		

Tampon, Signature :

Fiche d'autocontrôle type

Sujet: _____	No. de projet: _____
Adresse: _____	Date: _____
Lieu: _____	Personne compétente: _____
Section de construction: _____	Tel.: _____

Les mesures suivantes doivent être effectuées et enregistrées :

Exigences: température du support: **8° < t° < 30°C**
 >3° au delà de la température du point de rosée
 Humidité du béton: **< 4 %**

Appareil de mesure: _____, **No.:** _____ **No.:** _____

Date/horaire:					
Température ambiante:					
Température des lamelles:					
Température de l'élément:					
Température du point de rosée:					
Humidité ambiante relative:					
Humidité du béton dans les environs de la surface:					
Planéité du support					
Propreté du support					
Cohésion du support					
No. de lot de l'armature FRP					
No. de lot de la colle :					

Date/horaire:					
Température ambiante:					
Température des lamelles:					
Température de l'élément:					
Température du point de rosée:					
Humidité ambiante relative:					
Humidité du béton dans les environs de la surface:					
Planéité du support					
Propreté du support					
Cohésion du support					
No. de lot de l'armature FRP					
No. de lot de l'armature FRP					
No. de lot de la colle:					

Tampon, Signature :

Tableau des points de rosée

Température ambiante [°C]	Température du point de rosée (°C) pour une humidité ambiante de										
	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
2	-7.77	-6.56	-5.43	-4.40	-3.16	-2.48	-1.77	-0.98	-0.26	0.47	1.20
4	-6.11	-4.88	-3.69	-2.61	-1.79	-0.88	-0.09	0.78	1.62	2.44	3.20
6	-4.49	-3.07	-2.10	-1.05	-0.08	0.85	1.86	2.72	3.62	4.48	5.38
8	-2.69	-1.61	-0.44	0.67	1.80	2.83	3.82	4.77	5.66	6.48	7.32
10	-1.26	0.02	1.31	2.53	3.74	4.79	5.82	6.79	7.65	8.45	9.31
12	0.35	1.84	3.19	4.46	5.63	6.74	7.75	8.69	9.60	10.48	11.33
14	2.20	3.76	5.10	6.40	7.58	8.67	9.70	10.71	11.64	12.55	13.36
15	3.12	4.65	6.07	7.36	8.52	9.63	10.70	11.69	12.62	13.52	14.42
16	4.07	5.59	6.98	8.29	9.47	10.61	11.68	12.66	13.63	14.58	15.54
17	5.00	6.48	7.92	9.18	10.39	11.48	12.54	13.57	14.50	15.36	16.19
18	5.90	7.43	8.83	10.12	11.33	12.44	13.48	14.56	15.41	16.31	17.25
19	6.8	8.33	9.75	11.09	12.26	13.37	14.49	15.47	16.40	17.37	18.22
20	7.73	9.30	10.72	12.00	13.22	14.40	15.48	16.46	17.44	18.36	19.18
21	8.60	10.22	11.59	12.92	14.21	15.36	16.40	17.44	18.41	19.27	20.19
22	9.54	11.16	12.52	13.89	15.19	16.27	17.41	18.42	19.39	20.28	21.22
23	10.44	12.02	13.47	14.87	16.04	17.29	18.37	19.37	20.37	21.34	22.23
24	11.34	12.93	14.44	15.73	17.06	18.21	19.22	20.33	21.37	22.32	23.18
25	12.20	13.83	15.37	16.69	17.99	19.11	20.24	21.35	22.27	23.30	24.22
26	13.15	14.84	16.26	17.67	18.90	20.09	21.29	22.32	23.32	24.31	25.16
27	14.08	15.68	17.24	18.57	19.83	21.11	22.23	23.31	24.32	25.22	26.10
28	14.96	16.61	18.14	19.38	20.86	22.07	23.18	24.28	25.25	26.20	27.18
29	15.85	17.58	19.04	20.48	21.83	22.97	24.20	25.23	26.21	27.26	28.18
30	16.79	18.44	19.96	21.44	23.71	23.94	25.11	26.10	27.21	28.19	29.09
32	18.62	20.28	21.90	23.26	24.65	25.79	27.08	28.24	29.23	30.16	31.17
34	20.42	22.19	23.77	25.19	26.54	27.85	28.94	30.09	31.19	32.13	33.11
36	22.23	24.08	25.50	27.00	28.41	29.65	30.88	31.97	33.05	34.23	35.06
38	23.97	25.74	27.44	28.87	30.31	31.62	32.78	33.96	35.01	36.05	37.03
40	25.79	27.66	29.22	30.81	32.16	33.48	34.69	35.86	36.98	38.05	39.11
45	30.29	32.17	33.86	35.38	36.85	38.24	39.54	40.74	41.87	42.97	44.03
50	34.76	36.63	38.46	40.09	41.58	42.99	44.33	45.55	46.75	47.90	48.98

Le tableau indique, en fonction de la température de l'air et de l'humidité de l'air relative, à quelles températures de surface une condensation apparaît. Ainsi, p. ex. une température de l'air de 20 °C et d'une humidité de l'air relative de 70 %, une condensation apparaîtra sur des surfaces non absorbantes pour des températures de surface sous 14.4 °C.

1 Hypothèses de calculs

Les calculs sont menés conformément au BAEL et BPEL en retenant les hypothèses fondamentales du calcul béton :

- Les sections droites restent planes après déformation (hypothèse de Navier Bernoulli)
- Il n'y a pas de glissement relatif entre les armatures existantes, la fibre de carbone et le béton
- La résistance à la traction du béton est négligée
- Le comportement des matériaux aciers et béton, les coefficients de sécurité et les combinaisons des charges sont donnés dans les règlements usuels (BAEL – BPEL).

2 Notations utilisées

Géométrie :

- b_0 : largeur de la section
 h : hauteur de la section
 d : hauteur utile
 A_s (A_{st}) : section d'acier tendus (comprimés)
 A_f : section de fibres utilisées
 b_f : largeur du composite
 L_f : longueur du composite
 t_f : épaisseur du composite
 A_t : section des armatures transversales
 S_t : espacement des armatures transversales
 α : angle des armatures transversales avec la fibre moyenne de la poutre
 β : angle d'inclinaison des bielles d'about

Matériaux :

- f_{ct} (f_{ctj}) : résistance caractéristique à la compression (traction) du béton à j jours
 f_e : limite d'élasticité de l'acier
 f_{ed} : contrainte de dimensionnement retenue pour l'acier ($f_{ed}=f_e/\gamma_s$)
 f_{cd} : contrainte de dimensionnement retenue pour le béton ($f_{cd}=0.85 f_{ct28}/(\theta\gamma_b)$)
 f_{fd} : contrainte de dimensionnement retenue pour les lamelles
 σ_{bc} : contrainte dans le béton
 σ_s : contrainte dans l'acier tendu
 σ_c : contrainte dans l'acier comprimé
 σ_f : contrainte dans les fibres
 n : coefficient d'équivalence acier /béton ($n=E_s/E_b$) pris égal à 15 (BAEL A4.5,1)
 n' : coefficient d'équivalence fibres/béton ($n=E_f/E_b$)
 E_f : module d'élasticité de la fibre utilisée

Sollicitations :

- M_u : moment sollicitant la section à l'ELU
 M_E : moment sollicitant la section à l'ELS
 V_u : tranchant sollicitant la section à l'ELU
 τ_w : contrainte tangente à l'ELU

Calcul BA ELU-ELS:

- Y_u : distance de l'Axe Neutre à la déformation de la fibre la plus comprimée (ELU)
 Z : bras de levier

I_1 :	moment d'inertie de la section homogène
y_0 :	distance de l'Axe Neutre à la déformation de la fibre la plus comprimée (ELS)
f_{ctm} :	valeur de la résistance à la traction superficielle du béton
f_{ctd} :	valeur de calcul de la résistance à la traction superficielle du béton

Calcul BP ELU-ELS :

f_{prg} :	charge de rupture garantie
η :	coefficient de fissuration
B_t :	aire du béton tendu
σ_{Bt} :	valeur absolue de la contrainte maximale de traction
N_{Bt} :	résultante des contraintes de traction correspondantes (calculées en section non fissurée en classe 2 et 3)
B_n :	épaisseur nette
τ :	contrainte tangente de l'élément calculée à partir de l'épaisseur nette b_n
σ_x :	contrainte normale de la poutre calculée à partir de la section nette
σ_t :	contrainte normale transversale calculée à partir de l'épaisseur nette b_n
F_{tw} :	effort résistant des armatures de pré contraintes transversales
s_t' :	espacement des armatures transversales précontraintes mesurées perpendiculairement à la fibre moyenne
α' :	angle des armatures transversales précontraintes avec la fibre moyenne de la poutre
β_u :	angle des fissures d'effort tranchant avec la fibre moyenne de la poutre ($\beta_u > 30^\circ$)

3 Caractéristiques techniques des produits

3.1 Loi de comportement des armatures carbone (lamelles)

3.1.1 Lamelles S&P C-laminate

Les lois de comportement ainsi que les valeurs de calculs sont identiques au paragraphe correspondant du Dossier Technique Établi par le Demandeur.

3.2 Caractéristiques des résines S&P

3.2.1 S&P Resin 220 et S&P Resin 220 HP

Les lois de comportement ainsi que les valeurs de calculs sont identiques au paragraphe correspondant du Dossier Technique Établi par le Demandeur.

3.2.2 S&P Resin 55 et S&P Resin 55 HP

Les lois de comportement ainsi que les valeurs de calculs sont identiques au paragraphe correspondant du Dossier Technique Établi par le Demandeur.

3.3 Principe de calcul du renforcement vis à vis de la flexion

Condition préalable :

Renforcement en flexion :

1/ Dimensionnement de la section de fibre à mettre en œuvre à l'ELU sous chargement final
L'équilibre de la section donne :

$$A_f = \frac{M_u - A_s \cdot f_{sd} \cdot (z - (h - d)) + A_s' \cdot f_{sd} \cdot (z - (h - d'))}{z \cdot f_{fd}}$$

Avec

$$z = 0,8 \cdot h \cdot (1 + \sqrt{1 - 2\eta_u})$$

Et

$$\eta_u = \frac{M_u + A_s \cdot f_{sd} \cdot (h - d) - A_s' \cdot f_{sd} \cdot (h - d')}{b_0 \cdot f_{fd} \cdot h^2}$$

2/ Dimensionnement de la section de fibre à mettre en œuvre à l'ELS sous chargement final :

- le béton : $\sigma_{bcTOT} = \Delta\sigma_{bc} + \Delta\sigma_{bc} < 0,6 \cdot f_{c28}$
- l'acier comprimé : $\sigma_{scTOT} = \sigma_{sc} + \Delta\sigma_{sc} < \bar{\sigma}_s$
- l'acier tendu : $\sigma_sTOT = \sigma_s + \Delta\sigma_s < \bar{\sigma}_s$
- la fibre : $\sigma_{f\lim} = \min\{\sigma_{fd}; 450MPa\}$

NOTA :

La contrainte limite dans l'acier à considérer dépend du degré de fissuration retenu :

En fissuration peu préjudiciable, $\bar{\sigma}_s = f_s$

En fissuration préjudiciable et très préjudiciable (BAEL A.4.5,33 et A.4.5,34)

3/ Contrainte de glissement

On note :

S : l'effort d'entraînement qui varie comme l'effort tranchant

L'effort dans la lamelle s'exprime en fonction de la contrainte de glissement :

$$F_t = A_s \times f_{fd} - 0,5 \times S \times \frac{L_f}{2}$$

La contrainte de glissement est égale à :

$$\tau_{\text{glissement}} = \frac{S}{b_f} = 4 \times \frac{A_f \times f_{fd}}{b_f \times L_f}$$

La valeur obtenue est à comparer à la valeur de cisaillement limite à l'ELU.

3.4 Adhérence et vérification d'extrémité S&P C-Laminate.

Le principe de calcul est identique aux méthodes de calcul du Dossier Technique Établi par le Demandeur, pour les lamelles S&P C-laminate collées, pour les lamelles S&P C-Laminate engravées en vérifiant que $F_{bd} \geq F_{rd}$

Structures en béton précontraint

3.5 Calcul du renforcement vis à vis de la flexion

•Condition préalable :

Les éléments en béton précontraint ne pourront être renforcés que si la vérification est effectuée en classe immédiatement supérieure à celle du dimensionnement d'origine : ainsi, une section de classe 1 sera renforcée de manière à vérifier la classe 2, de même, une section de classe 2 sera renforcée et vérifiée en classe 3.

•Vérification ELS :

- en classe 2 :

Le calcul des contraintes est effectué en section non fissurée, en vérifiant les contraintes données dans le BPEL (art. 6.1,24)

Au moment du renforcement : $f_{tj}=0$ (aucune traction n'est admise)

En service : sous combinaison rare : f_{tj} dans la section d'enrobage ; $1.5 \times f_{tj}$ ailleurs

Sous combinaison fréquente : 0 dans la section d'enrobage

- en classe 3 :

Le calcul est effectué en section fissurée : calcul en flexion composée en considérant l'historique du renforcement :

Etape 1 : structure à l'état initial (avant renforcement)

Etape 2 : chargement de la structure renforcée

Etape 3 : structure à l'état final correspondant à superposition des états précédents

Dans tous les cas, sous combinaison quasi permanente : 0 dans la section d'enrobage (aucune contrainte de traction)

Les limitations sont les suivantes :

- pour le béton :

$0,6 f_{cj}$ (ou $0,5 f_{cj}$ sous combinaison quasi permanente)

- pour les aciers passifs :

En combinaison rare : $\sigma_s = \max\left\{\frac{2}{3} f_{tj}, 110 \sqrt{\eta \times f_{tj}}\right\}$

En combinaison fréquente : $0,35 f_e$

- pour les aciers de précontraintes : (exploitation)

En combinaison rare : la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à : $0,1 f_{prg}$ pour la post tension

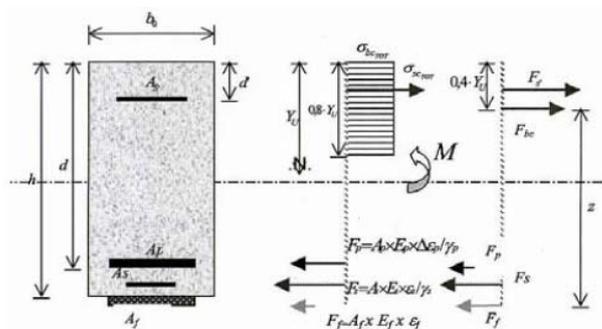
$\min\{0,1 \times f_{prg}; 150 \eta_p\}$ pour la prétension

En combinaison fréquente : la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à 100MPa

En combinaison d'exploitation: aucune traction n'est admise dans la section d'enrobage

- pour les fibres de carbone : σ_f
- Vérification ELU :

On vérifie que compte tenu de la géométrie de la section et de son ferrailage, le moment résistant de la section est supérieur au moment sollicitant.



- Aciers minimum :

L'article 6.1,32 du BPEL concernant le ferrailage mini à disposer en partie tendue est à respecter :

$$A_{s \text{ min}} = \frac{E_s}{1000} + \frac{N_{sE}}{\sigma_{sE}} \times \frac{f_{tj}}{f_e}$$