

Sur le procédé

S&P C-PreStress

Famille de produit/Procédé : Renforcement d'éléments de structure par collage de plaques ou plats composites

Titulaire(s) : **Société S&P Renforcement France**

AVANT-PROPOS

Les avis techniques et les documents techniques d'application, désignés ci-après indifféremment par Avis Techniques, sont destinés à mettre à disposition des acteurs de la construction **des éléments d'appréciation sur l'aptitude à l'emploi des produits ou procédés** dont la constitution ou l'emploi ne relève pas des savoir-faire et pratiques traditionnels.

Le présent document qui en résulte doit être pris comme tel et n'est donc **pas un document de conformité ou à la réglementation ou à un référentiel d'une « marque de qualité »**. Sa validité est décidée indépendamment de celle des pièces justificatives du dossier technique (en particulier les éventuelles attestations réglementaires).

L'Avis Technique est une démarche volontaire du demandeur, qui ne change en rien la répartition des responsabilités des acteurs de la construction. Indépendamment de l'existence ou non de cet Avis Technique, pour chaque ouvrage, les acteurs doivent fournir ou demander, en fonction de leurs rôles, les justificatifs requis.

L'Avis Technique s'adressant à des acteurs réputés connaître les règles de l'art, il n'a pas vocation à contenir d'autres informations que celles relevant du caractère non traditionnel de la technique. Ainsi, pour les aspects du procédé conformes à des règles de l'art reconnues de mise en œuvre ou de dimensionnement, un renvoi à ces règles suffit.

Groupe Spécialisé n° 3.3 - Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure

Versions du document

Version	Description	Rapporteur	Président
V1		PAYET Loïc	BERNARDIN-EZRAN Roseline

Descripteur :

Procédé de renforcement d'éléments de structure par collage de lamelle carbone pultrudée précontrainte

Le procédé C-PreStress se compose d'une lamelle carbone pultrudée précontrainte externe par post-tension, collé en surface. La liaison des lamelles est assurée par une résine époxy et des plaques métalliques à leurs extrémités fixées dans le béton, à l'aide de goujons (tiges filetées) pour transmettre l'effort de précontrainte à la structure renforcée. Le procédé peut être utilisé pour reprendre les efforts de flexion et/ou de traction.

Table des matières

1.	Avis du Groupe Spécialisé.....	5
1.1.	Domaine d'emploi accepté.....	5
1.1.1.	Zone géographique.....	5
1.1.2.	Ouvrages visés.....	5
1.2.	Appréciation.....	6
1.2.1.	Aptitude à l'emploi.....	6
1.2.2.	Durabilité.....	6
1.2.3.	Impacts environnementaux.....	6
1.3.	Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé.....	6
2.	Dossier Technique.....	8
2.1.	Mode de commercialisation.....	8
2.1.1.	Coordonnées du titulaire.....	8
2.1.2.	Identification des composants.....	8
2.2.	Description.....	8
2.2.1.	Principe.....	8
2.2.2.	Caractéristiques des composants.....	9
2.2.3.	Produits complémentaires.....	11
2.2.4.	Températures de transition vitreuse et températures maximales d'utilisation des résines.....	12
2.2.5.	Stockage – durée de vie.....	12
2.2.6.	Main d'œuvre spécifique nécessaire au système.....	12
2.3.	Propriétés mécaniques de calcul des matériaux.....	13
2.3.1.	Composite.....	13
2.3.2.	Béton et armatures existantes.....	13
2.4.	Justification à la rupture.....	13
2.5.	Dispositions de conception – selon l'Eurocode 2.....	14
2.5.1.	Notations.....	14
2.5.2.	Hypothèses de calcul.....	15
2.5.3.	Mise en précontrainte des lamelles FRP.....	15
2.5.4.	Renforcement en flexion d'éléments en béton armé.....	16
2.5.5.	Renforcement en flexion d'éléments en béton précontraint.....	18
2.5.6.	Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP.....	19
2.5.7.	Vérification du glissement à l'interface composite-béton.....	20
2.5.8.	Règles constructives.....	20
2.6.	Dispositions de mise en œuvre.....	20
2.6.1.	Support.....	20
2.6.2.	Conditions de pose.....	22
2.6.3.	Pose.....	22
2.6.4.	Contrôles.....	24
2.6.5.	Dispositions particulières en cas de pose avec le procédé S&P C-Sheet et/ou S&P C-Laminte.....	24
2.6.6.	Protection des éléments de renfort.....	25
2.6.7.	Sécurité du travail.....	26
2.7.	Maintien en service du procédé.....	26
2.8.	Assistante technique.....	26
2.9.	Principes de fabrication et de contrôle.....	26
2.10.	Résultats expérimentaux.....	26
2.11.	Références chantiers.....	27
2.12.	Annexe du Dossier Technique.....	28

2.12.1.	Annexe 1 : Caractéristiques mécanique du composite.....	28
2.12.2.	Annexe 2 : Essais d'adhérence suivant NF EN 1542.....	29
2.12.3.	Annexe 3 : Fiches d'autocontrôle	30
2.12.4.	Annexe 4 : Tableau des points de rosée	32
2.12.5.	Annexe 5 : Schéma de la platine d'ancrage et schéma des percements nécessaires à l'installation.....	33
2.12.6.	Annexe 6 : Mise en œuvre du procédé S&P C-PreSress sur appui dans les zones accessible aux personnes	36

1. Avis du Groupe Spécialisé

Le procédé décrit au chapitre 2 « Dossier Technique » ci-après a été examiné par le Groupe Spécialisé qui a conclu favorablement à son aptitude à l'emploi dans les conditions définies ci-après :

1.1. Domaine d'emploi accepté

1.1.1. Zone géographique

L'Avis est émis pour les utilisations en France Européenne (Métropole + Corse).

1.1.2. Ouvrages visés

Le domaine d'emploi accepté par le Groupe Spécialisé n°3.3 est celui couvrant les éléments 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 ou 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'utilisation du système est autorisée pour les charges cycliques (jusqu'à 4,2 Hz) pouvant entraîner de la fatigue.

L'utilisation du procédé pour le renforcement à l'effort tranchant des dalles et des poutres n'est pas visée dans le cadre du présent Avis Technique.

Le procédé S&P C-PreStress peut être associé aux procédés « S&P C-Laminate » et « S&P C-Sheet » de S&P Reinforcement France, qui font l'objet d'Avis Techniques en cours de validité.

Le renforcement aux sollicitations de traction et confinement des poteaux n'est pas visé par cet Avis.

Le renforcement à l'effort tranchant avec le procédé S&P C-Sheet sans ceinturage complet n'est pas admis dans le cas d'un moment négatif sur l'appui considéré.

Le renforcement de structures continues par des lamelles S&P C-PreStress en travée et sur les appuis de celle-ci dans le même temps, n'est pas permis.

L'utilisation du système dans les zones directement circulables par des véhicules (exemple de dalle brute de parking) n'est pas visé.

Le renforcement structural de radiers et de dallage n'est pas visé par cet Avis technique.

Aucun percement des lamelles n'est autorisé.

Afin d'éviter le risque de corrosion galvanique, le contact entre les lamelles de carbone et les plaques d'ancrage est évité à l'aide d'un joint de colle (S&P Resin 220 HP).

Les utilisations autres que celles prévues au présent domaine d'emploi, notamment les renforcements d'éléments constitués de matériaux autres que le béton (maçonnerie, bois et métal), sortent du champ du présent Avis.

Dans le cas d'une poutre renforcée à la flexion et à l'effort tranchant, la section de poutre prise en compte pour le dimensionnement en flexion doit être la même que celle prise pour le dimensionnement à l'effort tranchant.

L'augmentation des capacités résistantes par les procédés de renforcement n'est pas limitée aux charges variables au sens de la norme NF EN 1991-1.

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.

L'utilisation du procédé sur support ruisselant est exclue du domaine d'emploi : le taux d'humidité résiduel du support ne devra pas excéder 4% et l'humidité relative de l'air devra être inférieure à 95%.

L'Avis n'est valable que si la température du support au niveau de collage n'excède pas 40°C en service continu (durées > 24h) et 52°C en pointe (durées ≤ 24h).

Le procédé devra être protégé de l'exposition directe aux UV conformément au §2.7 du Dossier Technique.

L'utilisation en milieu agressif est admise en respectant les dispositions de l'article 2.6.5 du Dossier Technique.

Les renforcements d'ouvrages doivent être calculés conformément aux règles présentées dans le Dossier Technique. Celles-ci se réfèrent aux Eurocodes et aux Recommandations de l'AFGC de 2011 (Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites).

Le procédé S&P C-PreStress ne peut pas être utilisé dans les cas suivants :

- Surface du béton de cohésion superficielle inférieure à $f_{tk} = 1,5 \text{ MPa}$;
- Support béton de résistance à la compression inférieure à $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$;
- Epaisseur d'élément inférieure à 17 cm en cas d'utilisation de goujon mécanique BOAX- II A4 (M16)
- Epaisseur d'élément inférieure à 12 cm en cas d'utilisation de scellement chimique S&P ResEp 16 (M16)
- Milieux chimiques fortement agressifs en l'absence d'essai de durabilité sur les matériaux composites.

1.2. Appréciation

1.2.1. Aptitude à l'emploi

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

1.2.1.1. Stabilité

L'examen des performances de durabilité du système, au travers des essais de vieillissement accéléré, de fluage et de fatigue effectués par le demandeur, permet de conclure que le procédé conduit à l'augmentation des capacités résistantes des éléments renforcés, conformément à la méthode de calcul décrite dans le Dossier Technique établi par le demandeur, à condition de respecter strictement le domaine d'emploi donné au 1.1 du présent Avis.

1.2.1.2. Sécurité en cas d'incendie

1.2.1.2.1. Réaction au feu

En l'absence de Procès-Verbal de réaction au feu, les procédés sont non classés.

1.2.1.2.2. Résistance au feu

En ce qui concerne la résistance au feu, le procédé S&P C -PreStress ne participe pas à la tenue des éléments renforcés en l'absence d'une protection adéquate permettant de préserver les propriétés mécaniques de la colle.

Lorsqu'une protection au feu est prévue par-dessus le système, elle doit justifier d'un essai de résistance au feu effectué sur un support identique, par un laboratoire agréé par le Ministère de l'Intérieur. Une attention particulière doit être apportée au fait que les caractéristiques mécaniques de la colle diminuent rapidement lorsque la température augmente.

1.2.1.3. 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.

S&P Reinforcement propose à l'applicateur un Plan d'Assurance Qualité qu'il doit respecter. Il décrit le schéma organisationnel du chantier et des points de contrôle pour chaque étape de l'application. Autrement, l'applicateur soumet à l'acceptation du maître d'œuvre, du bureau de contrôle et de S&P Reinforcement son Plan d'Assurance Qualité.

1.2.1.4. 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. 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.

1.2.2. Durabilité

La durabilité des éléments renforcés est normalement assurée dans le domaine d'emploi accepté.

Comme précisé à l'article §1.1.2, cet Avis ne vise pas les utilisations en locaux (ou ambiances) suivants :

- Milieux chimiques fortement agressifs, en l'absence d'essai de durabilité effectués spécifiquement vis-à-vis du dit milieu chimique agressif ;
- Si la température du support au niveau de collage est susceptible de dépasser 40°C en service continu (durées > 24h) et 52°C en pointe (durées ≤ 24h).

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

1.2.3. Impacts environnementaux

Le procédé S&P C -PreStress 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.

1.3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

Le Groupe Spécialisé n°3.3 a fixé une limite de température en service continu et en pointe de respectivement 40°C et de 52°C pour le procédé S&P C -PreStress. Ces valeurs ont été définies en fonction de la température de transition vitreuse des résines utilisées et correspondent à celle pour laquelle le module d'élasticité de la colle commence à diminuer. L'attention est attirée sur le fait que les Règles AFGC (Février 2011) relatives aux éléments renforcés par composites fixent une température minimale de service continu de -20°C.

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.

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.

Les revêtements de protection décrits dans le Dossier Technique ne permettent pas de se dispenser du respect du domaine d'emploi accepté.

2. Dossier Technique

Issu des éléments fournis par le titulaire et des prescriptions du Groupe Spécialisé acceptées par le titulaire

2.1. Mode de commercialisation

Le système S&P C-PreStress est commercialisé par la société Simpson Strong-Tie sous la marque S&P Reinforcement.

2.1.1. Coordonnées du titulaire

S&P Reinforcement France marque de la Société Simpson Strong-Tie
 ZAC des 4 Chemins
 85400 Sainte-Gemme-la-Plaine
 France
 Tél. : 02 51 28 44 00
 Email : info@sp-reinforcement.fr
 Site Internet : www.sp-reinforcement.fr

2.1.2. Identification des composants

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

- Les lamelles carbone S&P C-Laminate SM sont livrées sur chantier en rouleau de 100 ml ou 150 ml. Une livraison à une longueur spécifique demandées par le client est possible. De toute manière, chaque lamelle livrée comporte une étiquette décrivant le nom du produit, son épaisseur, sa largeur et sa longueur.
- La résine S&P Resin 220 HP est livrée en kit comportant deux composants (résine + durcisseur). Les poids du kit complet et de ses composants sont spécifiés sur les étiquettes.
- La résine S&P Resin 230 HP est livrée en kit comportant 3 composants (résine + durcisseur + charge). Les poids du kit complet et de ses composants sont spécifiés sur les étiquettes.
- Les goujons mécaniques ou les scellements chimiques sont livrés sous forme de kit. Dans le premier cas, il s'agit d'une boîte comprenant les goujons d'ancrage et l'ensemble de visserie nécessaire. Dans le deuxième cas, il s'agit d'un kit comprenant des tiges filetées, l'ensemble de visserie nécessaire, les cartouches de scellement chimique et des pistolets d'extrusion. Chaque produit est étiqueté avec sa désignation.
- Le kit de mise en tension de la lamelle carbone est livré dans une caisse étiquetée pour désigner l'ensemble des pièces qui y figurent. Elle comporte des plaques d'ancrage, des vérins hydrauliques, des bâtis d'emplacement recevant les vérins, des écarteurs métalliques, des pinces métalliques, des rails de guidage, des gabarits de positionnement et de la visserie.

2.2. Description

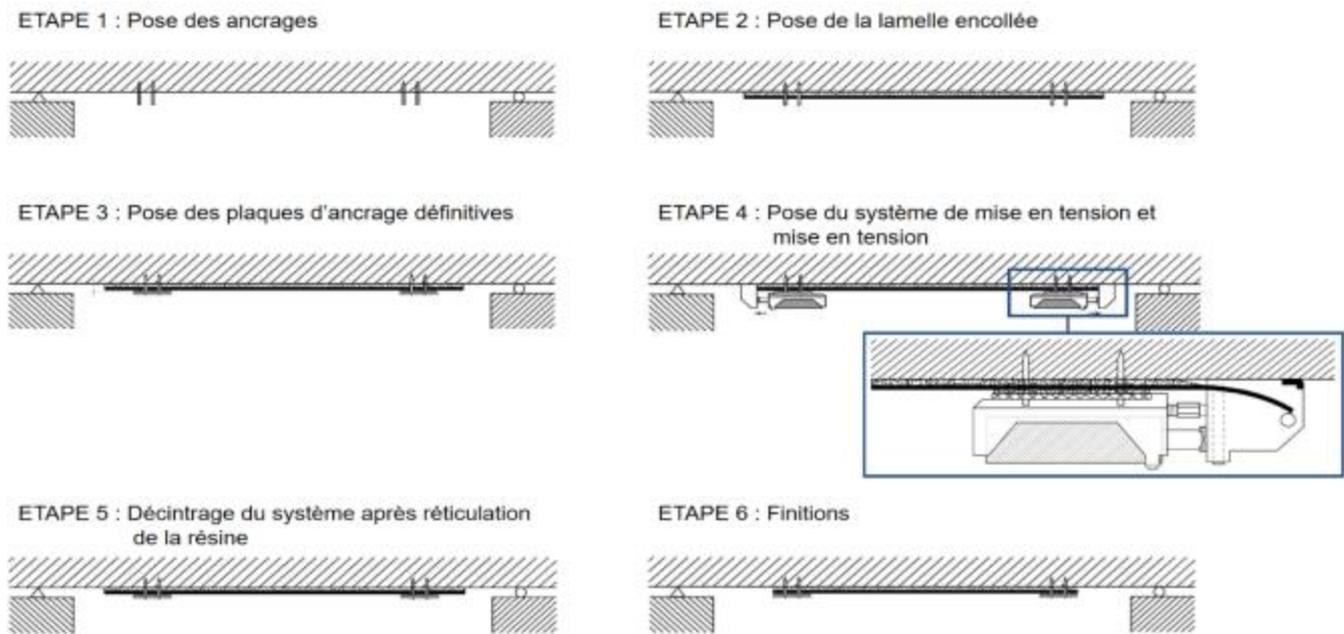
2.2.1. Principe

Le système dit « S&P C-PreStress » est un système de renforcement actif, par des lamelles pultrudées en fibre de carbone. Elles sont collées à la structure à renforcer par un adhésif époxydique et ancrées à leurs extrémités. Il s'agit de mettre en tension ces lamelles sur une surface préalablement préparée et de maintenir cet effort de traction jusqu'à la réticulation du joint de colle. L'effort de précontrainte est transmis à la structure par des ancrages aux extrémités. Le joint de résine le long de la lamelle est sollicité par les charges d'exploitation.

Le terme « précontrainte » est adopté dans ce qui suit en prenant comme référence la réticulation de la colle. En prenant la structure existante comme référence, il s'agit de post-contrainte additionnelle.

Le système de « S&P C-PreStress » est protégé par un brevet.

La figure ci-dessous présente un schéma de principe des différentes étapes de mise en œuvre du système S&P C-PreStress.



ETAPE 1 : La première étape consiste à poser des goujons d'ancrage.

ETAPE 2 : Ensuite, la lamelle encollée est posée sur le support préparé (colle fraîche)

ETAPE 3 : Des platines d'ancrage sont mise en place (colle fraîche)

ETAPE 4 : L'étape quatre est celle de la mise en tension (mise en tension réalisée lorsque la colle est fraîche). Un bâti accueillant un vérin hydraulique est fixé sur la platine d'ancrage et la lamelle est mordue par une pince. Cela est mis en place des deux côtés de la lamelle. Suivant la spécificité du chantier, la mise en précontrainte peut se faire par un seul côté ou par les deux côtés de la lamelle.

Lorsqu'une mise en précontrainte par un seul côté est adoptée, la pince de précontrainte du côté fixe est en buté sur le bâti métallique. L'effort de traction dans la lamelle est maintenu jusqu'à la réticulation de la résine.

ETAPE 5 et 6 : Les dernières phases consistent dans le démontage du système de mise en précontrainte et les étapes de finition. Les platines d'ancrage restent en place définitivement.

2.2.2. Caractéristiques des composants

Le système se compose des six éléments principaux suivants :

1. Le présent document
2. La note de calcul (conception et dimensionnement)
3. Les matériaux du système comme décrits ci-après
4. Le matériel d'application du système ainsi que le manuel de pose
5. La main d'œuvre spécifique nécessaire au système
6. Le Plan d'Assurance Qualité du procédé

Le traitement des différents aspects du système est réparti comme suit :

1. La description, la conception et le dimensionnement du système sont traités dans ce document.
2. Les matériaux du système sont décrits et leurs caractéristiques données dans le présent document. Les informations données couvrent ce qui est nécessaire à la conception et au dimensionnement.
3. Les conditions et les critères de pose requis sont décrites dans ce document.
4. Le matériel d'application est décrit dans le « Plan d'Assurance Qualité » du système.
5. Les informations quant à la traçabilité des matériaux et les contrôles sur chantier sont donnés dans ce document et détaillés dans le « Plan d'Assurance Qualité » du système.
6. La main d'œuvre spécifique nécessaire au système est décrite dans le « Plan d'assurance qualité » du système.

2.2.2.1. Définition des composites – Lamelle S&P C-Laminate

Les lamelles carbone S&P C-Laminate sont produites en usine en utilisant un processus de pultrusion. Elles sont disponibles en deux modules d'élasticité type SM (Standard Module) et type HM (Haut Module). La qualité SM est la seule qui peut être utilisée pour la précontrainte.

Exemple de désignation : S&P C-Laminate SM 80 / 1.4

S&P C-Laminate SM Référence du type de la lamelle

80 Largeur en millimètre de la lamelle

1,4 Epaisseur en millimètre de la lamelle

Un marquage est imprimé le long de la lamelle.

Le numéro de lot est apposé sur chaque rouleau.

Contrôles : Chaque lot fait l'objet de contrôles qualités (propriétés mécaniques et Tg)

Le tableau ci-dessous présente les références des lamelles pouvant être précontraintes.

Type de lamelles	Section	Effort de précontrainte maximum (pour 6‰ de déformation)	Effort dans la lamelle à 10‰ de déformation
S&P C-Laminate SM	[mm ²]	[kN]	[kN]
50 / 1.2	60	61.2	102.0
50 / 1.4	70	71.4	119.0
60 / 1.4	84	85.7	142.8
80 / 1.2	96	97.9	163.2
80 / 1.4	112	114.2	190.4
90 / 1.4	126	128.5	214.2
100 / 1.2	120	122.4	204.0
100 / 1.4	140	142.8	238.0

- Masse volumique : 1.6 g/cm³

- Taux de fibre : min. 68%

Le tableau ci-après donne les propriétés mécaniques de S&P C-Laminate SM :

Désignation	Symbole	Unité	Valeurs
Module d'élasticité (valeur moyenne)	E _{fu}	MPa	≥ 170 000
Module d'élasticité (Fractile 5%)	E _{fk}	MPa	≥ 168 000
Contrainte de rupture (valeur moyenne)	f _{fu}	MPa	≥ 2 800
Contrainte de rupture (Fractile 5%)	f _{fk}	MPa	≥ 2 700
Allongement moyen à la rupture	ε _{r,lim}	‰	≥ 16

2.2.2.2. S&P Resin 220 HP : Colle pour lamelles S&P C-Laminate

Colle époxy bi-composant pour le collage des lamelles S&P C-Laminate et des plaques d'ancrage du système S&P C-PreStress (marquage CE suivant la norme EN 1504).

- Densité : env. 1,6 g/cm³
- Epaisseur d'application : de 1 à 4 mm
- Résistance à la traction sur béton : ≥ 3,0 N/mm² (rupture dans le béton)
- Résistance à la traction sur acier : ≥ 14 N/mm²

* à 20° C et 65 % d'humidité relative

Produit	D.P.U.		Humidité du support	Application
	21° C	35° C		
colle epoxy S&P Resin 220 HP	~ 90 min.	~ 60 min.	< 4 %	Températures > 8 °C et < 35 °C

2.2.2.3. Dispositif d'ancrage pour les lamelles précontraintes

Le dispositif d'ancrage est constitué de :

- Une plaque d'ancrage en alliage d'aluminium EN AW-AlZn5Mg3Cu, de dimensions 272×200×12 mm et comportant 6 perçages de diamètre 18 mm.
- Les perçages sont espacés de 110 mm dans le sens longitudinal et de 140 mm dans le sens transversal.
- Le schéma de cette plaque d'ancrage est donné en annexe.
- Goujons d'ancrage ou scellement chimique de types :
 - Simpson BoAX-II 16/20 A4 (sous ATE 08/0276)
 - S&P ResEP 16 + S&P TRD-A4 M16-170/20 (sous ATE 11/0360)

2.2.3. Produits complémentaires

2.2.3.1. S&P Resin 230 HP : Mortier de reprofilage des supports

Mortier époxy bi-composant utilisé pour aplanir le support (si nécessaire) avant application des lamelles S&P C-Laminate (marquage CE suivant la norme EN 1504).

- Densité : env. 2,05 kg/l
- Epaisseur d'application : jusqu'à 50 mm
- Résistance à la traction sur béton : > 3,0 N/mm² (rupture dans le béton)

* à 20° C et 65 % d'humidité relative

Produit	D.P.U.		Humidité du support	Application
	21° C	35° C		
Mortier epoxy S&P Resin 230 HP	~ 90 min.	~ 60 min.	< 4 %	Températures > 8 °C et < 35 °C

2.2.3.2. S&P TECNOGROUT-FIB : Mortier de réparation structurelle

Mortier hydraulique R4 utilisé pour les travaux de réparation structurelle et les travaux de ragréage (marquage CE suivant la norme EN 1504).

- Densité : env. 1,8 g/cm³
- Epaisseur d'application : de 5 à 30 mm par couche
- Résistance à la traction sur béton : ≥ 3,0 N/mm²
- Résistance à la compression : ≥ 25 N/mm² à 1 jour

* à 20° C et 65 % d'humidité relative

2.2.3.3. S&P TECNOGROUT-N : mortier de réparation coulable

Mortier hydraulique R4 utilisé pour les travaux de réparation structurelle (marquage CE suivant la norme EN 1504).

- Densité : env. 1,9 g/cm³
- Epaisseur d'application : de 30 à 80 mm par couche
- Résistance à la traction sur béton : ≥ 2,5 N/mm²
- Résistance à la compression : ≥ 30 N/mm² à 1 jour

* à 20° C et 65 % d'humidité relative

2.2.3.4. S&P Tecnoimper-Flex : Revêtement souple d'imperméabilisation

Revêtement sous forme de mortier élastique à deux composants. Il est destiné à la protection et l'imperméabilisation des structures en béton.

- Densité : env. 1,4 g/cm³
- Perméabilité à l'eau liquide: $w < 0.05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ (selon EN1062-3)
- Perméabilité au CO₂ : $S_0 > 50\text{m}$ (selon EN 1062-6)
- Perméabilité à la vapeur d'eau : Classe I (selon EN ISO 7783)
- Résistance à la fissuration : Classe A4 (selon 1062-7)

2.2.3.5. S&P Tecnopint : Peinture anti-carbonatation pour la protection du béton

Peinture à base de résines acryliques en dispersion aqueuse, monocomposante, élastique et imperméable, pour la protection des structures en béton.

- Densité : env. 1,55 g/cm³
- Perméabilité à l'eau liquide: $w < 0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ (selon EN1062-3)
- Perméabilité au CO₂ : $S_0 > 70 \text{ m}$ (selon EN 1062-6)
- Perméabilité à la vapeur d'eau : Classe I (selon EN ISO 7783)
- Résistance à la fissuration : Classe A3 (selon 1062-7)

2.2.4. Températures de transition vitreuse et températures maximales d'utilisation des résines

Les températures de transitions vitreuse des résines T_g sont données dans le tableau ci-après :

Résine	Résine de pultrusion	S&P Resin 220 HP	S&P Resin 230 HP
T _g	> 100 °C	58°C	58°C

Les températures maximales d'utilisation des résines sont données dans le tableau ci-après :

Résine	Résine de pultrusion	S&P Resin 220 HP	S&P Resin 230 HP
T _{max} en service continu (> 24h)	Pas déterminant	40°C	40°C
T _{max} en pointe (≤ 24h)		52 °C	52 °C

La T_g de la S&P ResEP 16 est de 55 °C. Les températures d'utilisation sont données dans l'ETA de ce scellement chimique.

2.2.5. Stockage – durée de vie

Chaque emballage précise la date limite d'utilisation et les conditions de stockage appropriées.

2.2.6. Main d'œuvre spécifique nécessaire au système

La main d'œuvre est séparée en deux catégories distinctes : le personnel de l'entreprise applicatrice et le chargé de mise en précontrainte S&P Reinforcement.

2.2.6.1. Personnel de l'entreprise applicatrice

Son rôle est d'effectuer tous les travaux préparatoires. De ce fait, elle doit être formée et familière avec les technologies employées. La formation de celle-ci est assurée par le chargé de précontrainte S&P. La formation consiste à transférer à l'entreprise les points permettant d'appréhender la pose du système (cf. Plan d'Assurance Qualité pour plus de détail).

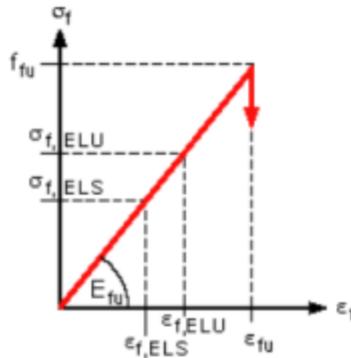
2.2.6.2. Chargé de mise en précontrainte S&P

Son rôle est d'encadrer la phase de mise en place de la précontrainte de l'armature carbone S&P C-Laminate. Le chargé de mise en précontrainte S&P réceptionne de façon contradictoire avec l'entreprise les travaux préparatoires à la mise en tension des lamelles. Il encadre les préparations pour équiper les supports du matériel de précontrainte. Le chargé de mise en précontrainte assiste la mise en œuvre et retranscrit la totalité des faits majeurs dans un registre qualité tenu par l'entreprise applicatrice. Il a pour mission l'information et la mise en garde sur une pratique pas ou peu adaptée. En aucun cas il n'a le pouvoir d'aller à l'encontre de l'entreprise et reste dans une mission de conseil. En cas de danger grave et imminent, il pourra faire valoir son droit de retrait. Le paragraphe 3.4.2 du Plan d'Assurance Qualité donne de plus amples détails sur son rôle.

2.3. Propriétés mécaniques de calcul des matériaux

2.3.1. Composite

2.3.1.1. Loi de comportement et valeurs de calcul



Le matériau FRP a un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture.

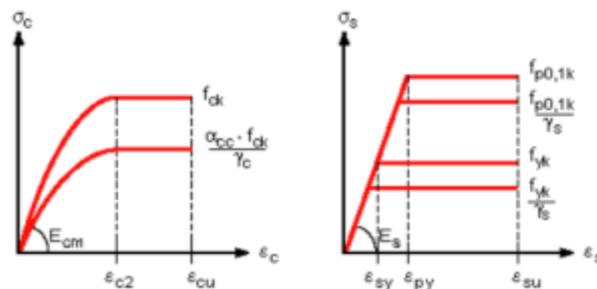
Les valeurs moyennes et de dimensionnement sont données ci-dessous :

Désignation	Symbole	Unité	Valeurs
Module d'élasticité (valeur moyenne)	E_{fu}	MPa	$\geq 170\ 000$
Module d'élasticité (valeur de calcul)	E_{fd}	MPa	170 000
Contrainte de rupture (valeur moyenne)	f_{fu}	MPa	$\geq 2\ 800$
Contrainte de dimensionnement à l'ELU	$f_{fd,ELU}$	MPa	1 700
Contrainte de dimensionnement à l'ELS	$f_{fd,ELS}$	MPa	1 518

2.3.2. Béton et armatures existantes

Un diagnostic préalable de l'état de la structure à renforcer devra être réalisé avant toute étude d'exécution. Il devra permettre de caractériser les dimensions, les sections, la nature et la résistance des armatures et du béton en présence.

Les lois de comportements types décrites dans l'Eurocode 2 peuvent être utilisées pour le dimensionnement :



Béton Acier d'armature / de précontrainte

2.4. Justification à la rupture

Cette justification est à effectuer dans tous les cas hors situation incendie et situation sismique. 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 Caractéristique $G + Q_1 + \Psi_{0i} \cdot Q_i$, où G représente la sollicitation due à la charge permanente et $\Psi_{0i} \cdot Q_i$ 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 0,40 (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 0,33 (S2), 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).

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.

Les limites ci-dessus se justifient par les éléments suivants :

- Un plan Assurance Qualité minimisant les risques d'une application non-conforme.
- Un contrôle externe de la part du chargé de mise en précontrainte S&P.
- Un ancrage par scellements chimiques ou goujons mécaniques éprouvé.
- Un risque de délaminage minimisé grâce à la précontrainte qui empêche l'apparition de fissures.

2.5. Dispositions de conception – selon l'Eurocode 2

Le dimensionnement du renforcement en lamelles S&P C-Laminate précontraintes doit être réalisé par un bureau d'études de structure formé à cette technique. L'approche d'ingénierie de ce type de procédé est particulière. La plus grande attention doit être apportée au dimensionnement, mais surtout à la conception même du renforcement.

S&P met à disposition des calculateurs un logiciel de dimensionnement développé en interne. La responsabilité des résultats fournis par le logiciel 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 de celui-ci suivant le cahier des charges fourni, de la définition des hypothèses, des données d'entrée et de l'interprétation des résultats.

Le BET doit fournir une note de calcul assisté par le logiciel FRP LAMELLA, logiciel fourni par S&P Renforcement France.

Le BET doit fournir un plan précis de pose des renforcements.

Dans tous les cas, S&P conserve un droit de regard sur le calcul de son système afin d'en vérifier la faisabilité technique mais n'a pas pour mission de vérifier les données d'entrées et de sorties du BET.

2.5.1. Notations

Matériau FRP

E_{fu} Module d'élasticité moyen du matériau FRP

E_{fk} Module d'élasticité caractéristique du matériau FRP

E_{fd} Module d'élasticité de dimensionnement du matériau FRP

ϵ_{fk} Allongement caractéristique à la rupture du matériau FRP

$\epsilon_{f,limit}$ Allongement limite du matériau FRP (allongement de dimensionnement)

ϵ_{fp} Allongement des lamelles lors de la mise en précontrainte

$\epsilon_{fp,limit}$ Allongement limite des lamelles lors de sa mise en tension

$\Delta\epsilon_f$ Allongement supplémentaire des lamelles après durcissement de la colle (dû aux surcharges d'exploitation)

$\Delta\epsilon_{f,limit}$ Allongement supplémentaire limite des lamelles après durcissement de la colle

$\epsilon_{f,a,d}$ Allongement équivalent induit par l'effort de rupture de l'ancrage F_{ad}

f_{fu} Contrainte moyenne de rupture à la traction du matériau FRP

f_{fk} Contrainte caractéristique de rupture à la traction du matériau FRP

f_{fd} Contrainte de dimensionnement à la traction du matériau FRP

n_f Nombre de couches superposées de FRP (maximum $n_f=1$)

m_f Nombre de bandes juxtaposées de FRP

s_f Entraxe des bandes de FRP

A_f Section de l'armature FRP

t_f Epaisseur de l'armature FRP

b_f Largeur de l'armature FRP

a_r Distance entre axe des lamelles et bord libre de l'élément

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

N_{fp} Force de précontrainte FRP

M_{fp0} Moment de précontrainte isostatique FRP
 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

$F_{fd,E}$ Force de traction du renfort FRP au point E
 l_a Longueur de la plaque d'ancrage du renfort FRP
 F_{ad} Valeur de dimensionnement de la force de rupture de l'ancrage
 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 Eurocode 2

2.5.2. Hypothèses de calcul

Les calculs sont menés conformément à l'Eurocode 2 en appliquant les règles mécaniques connues du dimensionnement classique du béton armé :

- 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.
- 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 :

$$E_{df} \leq R_{df} \quad (1)$$

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

2.5.3. Mise en précontrainte des lamelles FRP

Les lamelles FRP peuvent être précontraintes avant le durcissement de la colle jusqu'à un allongement ($\epsilon_{fp,limit}$) de 6 ‰, grâce à un système de précontrainte spécial S&P. Nous pouvons ainsi introduire des forces de précontrainte jusqu'à 143 kN par lamelle.

Pour introduire la force de précontrainte, les extrémités de la lamelle sont ancrées dans l'élément en béton par des plaques d'aluminium collées et goujonnées ou scellées chimiquement.

Des essais sur des éléments de construction ont montré que le système de précontrainte est capable de reprendre les forces agissantes et qu'avec des allongements initiaux jusqu'à 6 ‰ l'ancrage est garanti.

Dans tous les cas, le dispositif d'ancrage doit être vérifié selon l'ATE (Agrément Technique Européen) de l'ancrage retenu (goujons mécaniques ou scellements chimiques) en considérant les données du projet (dimension de l'élément à renforcer, caractéristiques des matériaux, distance au bord, etc). La méthode de conception est celle de l'ETAG 001 Annex C / TR 029.

2.5.4. Renforcement en flexion d'éléments en béton armé

2.5.4.1. Principe de dimensionnement

La conception d'un renforcement avec le procédé S&P C -PreStress doit intégrer quelques éléments d'ingénierie connus des bureaux d'étude compétents pour le dimensionnement de renforts par précontrainte additionnelle, et dont les règles de calcul de base sont les Eurocodes. Ci-dessous une liste non-exhaustive :

- L'impact de la précontrainte additionnelle sur les parties adjacentes de la structure.
- Le fluage du béton vis-à-vis de la précontrainte additionnelle.
- La vérification des aciers existants vis-à-vis de la fatigue pour les charges cycliques.
- La vérification des ancrages vis-à-vis de l'ATE de la solution retenue (goujons mécaniques ou scellements chimiques).

Le bureau d'étude doit vérifier chaque point supplémentaire qu'il jugera nécessaire d'aborder par rapport à la spécificité du projet.

Le fluage de la lamelle précontrainte sur la surface du béton a été évalué par différents essais à long terme, dans deux universités différentes. Les conclusions des rapports indiquent qu'il n'y a pas de glissement des lamelles carbone sur le support béton, dans le temps.

Néanmoins, nous préconisons la prise en compte d'une perte de précontrainte de l'ordre de 10% de l'allongement (ϵ_{fp}). La note de calcul du renforcement se doit de traduire ce fait comme suit :

- Le renforcement de la section critique est calculé en prenant en compte cette éventuelle perte de précontrainte de 10% de l'allongement (ϵ_{fp}).
- La vérification des limitations de contrainte de compression du béton et la vérification de l'ancrage sont effectuées sans prise en compte de perte de précontrainte (cas le plus défavorable).

Concrètement, la note de calcul doit être produite avec le logiciel Lamella en considérant deux configurations : un dimensionnement considérant une perte de précontrainte estimée à 10% de l'allongement (ϵ_{fp}), soit un allongement de 90% (ϵ_{fp}).

Les principes et la méthode de dimensionnement décrits dans ce paragraphe s'appliquent pour une section fléchie sur appui et en travée. En effet, la conception du renforcement et les vérifications à effectuer sont similaires pour ces deux cas, sauf pour la détermination du point E définissant la position de la vérification de l'ancrage (voir paragraphe 2.5.6).

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.

La détermination de l'effort de précontrainte nécessaire F_{fp} est liée à la détermination de l'effort total nécessaire dans la lamelle F_f pour satisfaire aux équations d'équilibre (5) et (6) et aux vérifications adéquates à l'ELS. L'effort total nécessaire dans la lamelle F_f est une addition de l'effort de précontrainte et du delta d'effort dû aux surcharges (état final) : $F_f = F_{fp} + \Delta F_f$

Forces internes

$$\text{Acier } F_s = E_s \cdot A_s \cdot \epsilon_s \leq A_s \cdot f_{yk} / \gamma_s \quad (2)$$

$$\text{FRP } F_f = E_f \cdot A_f \cdot \epsilon_f \quad \text{avec } \epsilon_f \leq \epsilon_{f,limit} \quad (3)$$

$$\text{Béton } F_c = b \cdot \alpha_R \cdot x \cdot \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c \quad (4)$$

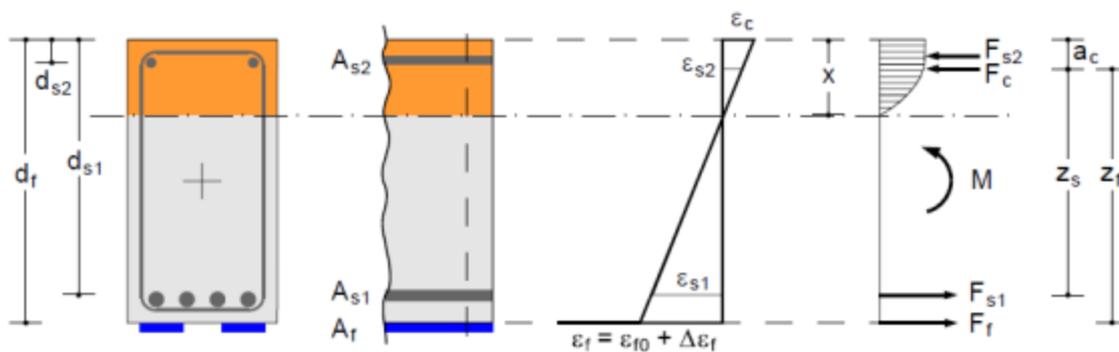
(α_R : paramètre de courbe parabolique)

Conditions d'équilibre

$$\Sigma H = 0 ; F_c - F_s - F_f = 0 \quad (5)$$

$$\Sigma M = 0 ; F_c \cdot a_c - F_s \cdot d_s - F_f \cdot d_f = 0 \quad (6)$$

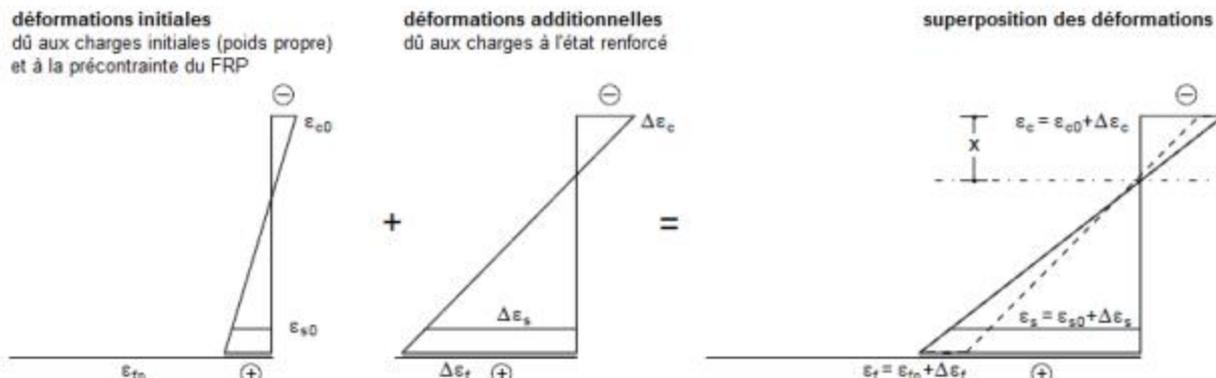
La résolution des conditions d'équilibre s'effectue itérativement en variant les allongements dans la zone comprimée et la zone tendue. La satisfaction de ces conditions est testée à chaque itération jusqu'à la résolution des équations d'équilibre.



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 initial à celui dû à la sollicitation supplémentaire de l'état renforcé.

L'allongement des lamelles S&P C-Laminate précontraintes se compose de l'allongement initial ϵ_{fp} dû à la précontrainte et de l'allongement supplémentaire $\Delta\epsilon_f$ dû aux charges après durcissement de la colle. Pour l'allongement total il faut respecter la condition suivante :

$$\epsilon_f = \epsilon_{fp} + \Delta\epsilon_f \leq \epsilon_{f,limit} \quad (7)$$



2.5.4.2. Allongements limites du FRP

Suivant les essais expérimentaux, les lamelles précontraintes peuvent être utilisées jusqu'à la résistance à la rupture en traction du matériau. On introduit en outre un facteur de réduction k_ϵ pour l'allongement limite des lamelles pour tenir compte de la ductilité réduite des sections renforcées au FRP.

$$\epsilon_{f,limit} = k_\epsilon \cdot \epsilon_{fu} / \gamma_f \text{ avec } \gamma_f = 1,2 \text{ et } k_\epsilon = 0,8 \quad (8)$$

Lamelle S&P C-Laminate SM $\epsilon_{f,limit} = 10,00$ [%o]

L'adhérence de la lamelle S&P C-Laminate sur le béton n'est sollicitée que par l'allongement supplémentaire dû aux charges. Afin d'empêcher une délamination entre les zones d'ancrage d'extrémité, l'allongement supplémentaire $\Delta\epsilon_f$, au droit de la section critique renforcée, est limité de la façon suivante :

$$\Delta\epsilon_f \leq \Delta\epsilon_{f,limit} \quad (9)$$

Lamelle S&P C-Laminate SM $\Delta\epsilon_{f,limit} = 6,0$ [%o]

Les limitations d'allongement des lamelles S&P C-Laminate sont résumées ci-dessous. Elles doivent toutes être satisfaites.

$$\epsilon_f = \epsilon_{fp} + \Delta\epsilon_f \leq \epsilon_{f,limit} = 10,0$$
 [%o]

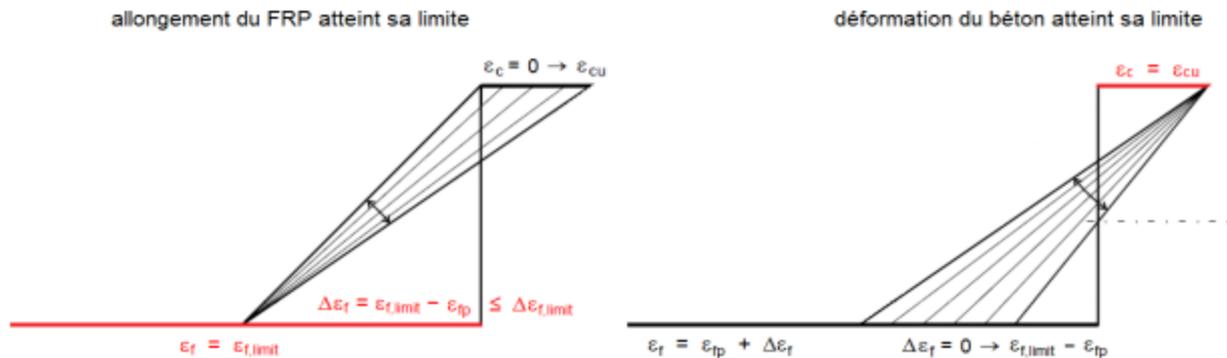
$$\epsilon_{fp} \leq \epsilon_{fp,limit} = 6,0$$
 [%o]

$$\Delta\epsilon_f \leq \Delta\epsilon_{f,limit} = 6,0$$
 [%o]

Les deux valeurs ε_{fp} et $\Delta\varepsilon_f$ ne peuvent pas valoir 6,0 [‰] en même temps. L'ingénieur structure fait le choix de la valeur de précontrainte adéquate ε_{fp} afin de satisfaire à l'équation (7), en fonction de la valeur $\Delta\varepsilon_f$ et des paramètres du projet de renforcement.

2.5.4.3. État limite ultime

À l'état limite ultime, les matériaux doivent respecter leur déformation limite (déformation de dimensionnement à l'ELU). En règle générale l'état limite ultime est déterminé par l'allongement limite du système FRP.



Dans le cas d'une analyse plastique de la structure, il convient pour x_u/d de ne pas excéder 0,45 pour des bétons de classe de résistance inférieure ou égale à C50/60 et 0,35 pour des bétons de classe de résistance supérieure ou égale à C55/67, et ce dans la région des rotules plastiques. Ceci doit être fait en respectant la limite d'allongement de la lamelle $\varepsilon_{f,limit}$.

Pour le système S&P C-PreStress, les degrés de renforcement à la flexion sont définis comme suit :

$$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 2.5 \quad \text{pour les éléments principaux} \quad (10)$$

$$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 3 \quad \text{pour les éléments secondaires} \quad (11)$$

Cela se justifie par les éléments suivants :

- Un plan Assurance Qualité minimisant les risques d'une application non-conforme.
- Un contrôle externe de la part du chargé de mise en précontrainte S&P.
- Un ancrage par scellements chimiques ou goujons mécaniques éprouvé.
- Un risque de délaminage minimisé grâce à la précontrainte qui empêche l'apparition de fissures.

2.5.4.4. État limite de service

À l'état limite de service, l'armature interne ne doit pas dépasser la limite élastique. Les contraintes à l'état limite de service, aussi bien pour le béton que pour les aciers, sont déterminées et comparées aux limites données par l'Eurocode 2 :

- Contrainte dans l'acier : $\sigma_{slim} = 0,80 f_{yk}$ sous combinaison caractéristique.
- Contrainte dans le béton : $\sigma_{clim} = 0,60 f_{ck}$ sous combinaison caractéristique.
- Contrainte dans le béton : $\sigma_{clim} = 0,45 f_{ck}$ sous combinaison quasi-permanente.
- Contrainte dans les armatures de précontrainte : $\sigma_{plim} = 0,8 f_{pk}$ (cas de la précontrainte adhérente) sous combinaison caractéristique.

2.5.5. Renforcement en flexion d'éléments en béton précontraint

2.5.5.1. Principe de dimensionnement

Pour les éléments de béton précontraint, 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 M_{Ek0} , M_{Edf} et M_{Ekf} .

Les éléments en béton précontraint sont en règle générale non fissurés dans la zone proche de l'appui. Autrement, l'armature FRP collée doit toujours être ancrée en arrière de la dernière fissure de flexion.

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. Cette procédure de vérification est donnée dans le paragraphe 2.5.6.

Le paragraphe 2.5.4.1 s'applique en considérant les armatures de précontrainte et l'effort F_p .

Conditions d'équilibre

$$\Sigma H = 0 ; F_c - F_s - F_p - F_f = 0$$

$$\Sigma M = 0 ; F_c \cdot a_c - F_s \cdot d_s - F_p \cdot d_p - F_f \cdot d_f = 0$$

2.5.5.2. Allongements limites du FRP

Le paragraphe 2.5.4.2 s'applique.

2.5.5.3. État limite ultime

Le paragraphe 2.5.4.3 en considérant les armatures de précontrainte.

2.5.5.4. État limite de service

Le paragraphe 2.5.4.4 s'applique. De plus, Il convient de s'assurer que la section d'enrobage est complètement comprimée sous la combinaison d'action quasi permanente.

La limitation de contrainte des armatures précontraintes est donnée ci-dessous :

$$\sigma_{plim} = 0,8 \cdot f_{pk} \text{ sous combinaison caractéristique.}$$

2.5.6. Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP

Les extrémités des lamelles du système de précontrainte S&P sont ancrées dans l'élément en béton par des plaques d'alliage d'aluminium collées et goujonnées (ou scellées chimiquement). Cet ancrage est sollicité par la force de la précontrainte F_p de la lamelle. Le surcroît de force de traction ΔF_{fd} dans la lamelle, causé par la sollicitation flexionnelle de l'élément est déterminé par une itération de l'équilibre à partir du moment de flexion donné au point E.

$$F_{fd,E} = F_p + \Delta F_{fd} \quad (12)$$

La vérification de l'ancrage est effectuée à l'état limite ultime en tenant compte des facteurs de sécurité partiels. Il faut prouver que la force de rupture F_{ad} du système d'ancrage est plus grande que la force de traction existante $F_{fd,E}$ dans les lamelles FRP, à l'extrémité de l'ancrage (au point E).

$$F_{ad} \geq F_{fd,E} \quad (13)$$

La force de rupture d'ancrage du système de précontrainte est équivalente à l'effort qu'induit un allongement de lamelle dans la zone d'ancrage, limité à $\varepsilon_{f,a,d}$ (comprenant un coefficient de sécurité de $\gamma_a = 1,3$)

Des essais sur des éléments de construction ont montré que le système d'ancrage est capable de reprendre des forces de dimensionnement équivalentes à un allongement de la lamelle jusqu'à 6.5 ‰ (allongement dû à la mise en précontrainte + allongement dû aux surcharges après durcissement de la colle).

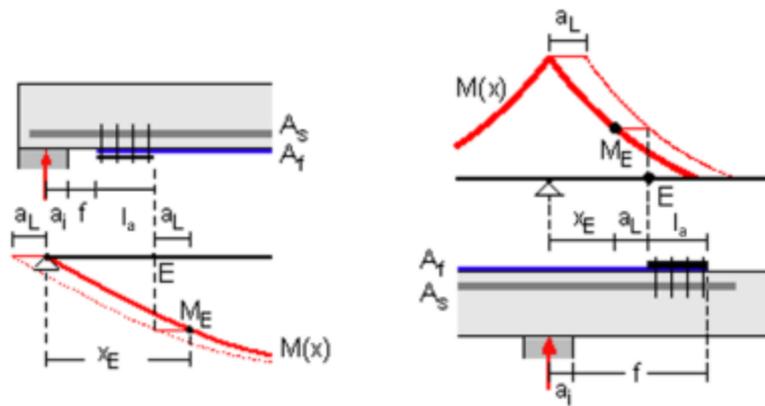
$$F_{ad} = A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{f,a,d} \text{ avec } \varepsilon_{f,a,d} = 6,5 \text{ ‰} \quad (14)$$

La position du point E pour la vérification de l'ancrage est dessinée dans les graphiques ci-dessous. La distance X_E entre le point E et l'axe de l'appui est calculée comme suit :

$$\text{moment en travée } x_E = a_i + f + l_a + a_L \quad (15)$$

$$\text{moment sur appui } x_E = a_i + f - l_a - a_L \quad (16)$$

La valeur de f est déterminée par le dimensionnement et indiquée sur le plan d'exécution.



Dans le cadre de la vérification de l'ancrage de l'armature de flexion à l'appui, il convient de prendre en considération l'angle d'inclinaison des bielles ou un effort à ancrer égal à $1,25.V_{ed}$.

2.5.7. Vérification du glissement à l'interface composite-béton

La vérification consiste à s'assurer que la contrainte de cisaillement à l'interface composite-béton, due aux déformations additionnelles des charges à l'état renforcé, 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.

À l'ELU et combinaisons accidentelles : $\tau_{m, \text{lim}, ELU} = \min(1,55; \frac{f_{tk}}{1,5})$;

À l'ELS : $\tau_{m, \text{lim}, ELS} = \min(1,09; \frac{f_{tk}}{2})$.

2.5.8. Règles constructives

En plus des contraintes de dimensionnement donnant lieu à des espacements et entraxes à respecter pour les lamelles en carbone et les ancrages, les conditions de pose et les appareils utilisés pour la mise en précontraintes induisent également des espacements minimums. Ces informations sont présentes dans notre guide d'application et peuvent être obtenues auprès de S&P Reinforcement France.

2.5.8.1. Espacement entre lamelles

Les espacements minimums entre les lamelles sont gouvernés par les espacements minimums des dispositifs d'ancrage et des espacement nécessaire à la mise en tension des lamelles (relatifs au dispositif de mise en tension).

Les entraxes minimums sont de :

- 180 mm pour des lamelles précontraintes de 100 mm
- 155 mm pour des lamelles précontraintes de 50 mm

2.5.8.1.1. Espacement entre tiges filetées ou goujons mécaniques

Les espacements entre les tiges filetées et les goujons mécaniques devront être respectivement conforme au ATE suivant :

- ATE 11/0360 en cas d'utilisation du scellement chimique S&P ResEP 16 et des tiges S&P TRD-A4 M16-170/20
- ATE 08/0276 en cas d'utilisation des goujons mécaniques Simpson BoAX-II 16/20 A4

2.5.8.1.2. Superposition des lamelles

La superposition des lamelles dans le sens longitudinal du renforcement n'est pas permise.

Le croisement des lamelles est permis en respectant les dispositions de mise en œuvre (entre autres, les aspects de planéité).

2.6. Dispositions de mise en œuvre

2.6.1. Support

2.6.1.1. Qualité du support

Un support sain est indispensable pour réaliser un renforcement avec des Lamelles S&P C-Laminate précontraintes. Le support doit présenter une contrainte d'adhérence de traction d'au moins 1.5 N/mm^2 et une résistance à la compression : $f_{ck} \geq 20 \text{ MPa}$. Les ragréages pelliculaires sont éliminés. On éliminera toutes les substances étrangères telles que saleté, huiles et graisses. Juste avant l'application de la colle à base de résine époxy S&P Resin 220 HP ou de la résine de compensation S&P Resin 230 HP, la surface sera débarrassée des particules libres à la brosse ou à l'aspirateur.

2.6.1.2. Injection des fissures

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

2.6.1.3. Préparation du support

La préparation peut se faire par ponçage, sablage, grenailage, fraisage suivant la surface ou tout autre préparation garantissant les caractéristiques minimums requises d'adhérence ($> 1.50 \text{ N/mm}^2$). Un hydro sablage 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.

2.6.1.4. Vérification de la qualité du support et de sa planéité

2.6.1.4.1. Détermination de la résistance à la traction du support

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

Le tableau ci-dessous détermine les valeurs minimales pour les lamelles S&P C-Laminate précontraintes.

Système de renforcement FRP	Valeurs minimales de résistance à la traction du support
Lamelles S&P C-Laminate	$> 1.5 \text{ N/mm}^2$

Sur la surface de béton soigneusement préparée, on déterminera la résistance à la traction du béton en cinq endroits au moins. La zone d'arrachement est délimitée par une saignée d'au moins 5 mm réalisée par sciage ou par carottage (EN 1542).

Si l'on utilise un mortier de reprofilage, on exécutera en bordure de la surface traitée, de 1 essai à 3 essais par m² pour de grandes surfaces.

La valeur moyenne établie sur la base de 5 essais au minimum ne doit pas être inférieure à la valeur seuil indiquée dans le tableau précédent.

2.6.1.4.2. Vérification de la résistance des goujons / scellement

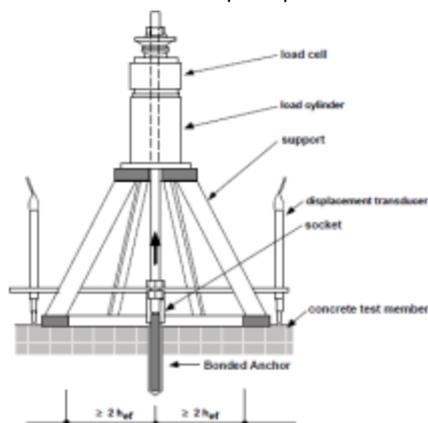
La qualité minimum du béton devra être conforme aux ETA-11/0360 ou ETA-08/0276 (soit un béton C20/25 au minimum).

La qualité du béton devra être vérifiée par des essais de compression sur des carottages réalisés in-situ.

La qualité du béton déduite de ces essais doit concorder avec celle de la note de calcul des ancrages.

Les sondages préalables à l'application du système S&P C-PreStress doivent démontrer un ferrailage minimum en conformité avec l'Eurocode 2.

Avant l'installation du système S&P C-PreStress, une vérification par un test d'arrachement selon la section 5 de l'ETAG 001 (unconfined test) doit être faite. Il s'agit de s'assurer que les valeurs de l'ETA correspondant sont atteintes. Un schéma de principe du test est donné ci-dessous (se référer à l'ETAG 001 pour plus de détail) :



Il est recommandé au maître d'œuvre de procéder aux essais décrits ci-dessus en phase de conception. A défaut, ces derniers seront réalisés par l'entreprise applicatrice.

2.6.1.4.3. Planéité de la surface de béton préparée

Les systèmes FRP S&P ne doivent pas se coller sur des supports irréguliers, ce qui pourrait entraîner des concentrations de contraintes ou des contraintes de déviations indésirables.

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. Au-delà de ces limites d'irrégularités, l'article suivant donne la démarche à suivre.

Les surfaces convexes ne sont pas concernées par cet article.

2.6.1.4.4. Contre flèche et structures concaves

Sur des structures ayant une contre flèche ou étant concave les lamelles pourraient se détacher du support lors de la mise en précontrainte. On prêtera donc une attention toute particulière à la préparation du support de ce type de structures. Pour les problèmes de contre flèche ou les supports concaves de manière générale, nous isolons 4 cas de figures caractérisés par l'amplitude de la contre flèche « f » avec la préparation que nous préconisons pour chacune d'elles :

- $0 < f < 1 \text{ cm}$: appliquer directement de la colle S&P RESIN 220 HP pour reprofilage et le collage
- $1 \leq f < 4 \text{ cm}$: appliquer du mortier époxydique de reprofilage S&P RESIN 230 HP puis collage de la lamelle
- $4 \leq f < 7 \text{ cm}$: application d'un mortier hydraulique de classe R4 au sens de la norme EN 1504-3, attention au délai de recouvrement (durcissement + diminution humidité + ponçage), puis collage de la lamelle
- $f \geq 7 \text{ cm}$: recharge en béton armé ou béton projeté, attention au délai de recouvrement (durcissement + diminution humidité + ponçage), puis collage de la lamelle.

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.

2.6.2. Conditions de pose

Pendant les travaux de collage et jusqu'à durcissement de la colle époxy S&P Resin 220 HP on évitera les vibrations dans le rayon d'action de l'armature collée ainsi que les dégagements de poussière ou toutes autres conditions qui pourraient nuire au collage. Les points ci-dessous doivent être contrôlés avant la pose :

- Point de rosée
- Humidité du support
- Température ambiante

2.6.2.1. Détermination du point de rosée

Pour déterminer la température du point de rosée, il convient de mesurer l'humidité relative de l'air, la température de l'air ainsi que la température du support. 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. La température du support doit être au moins de 3 °C supérieure à la température du point de rosée (cf. tableau des points de rosée en annexe). Si ce n'est pas le cas, il faut soit réchauffer le support soit abaisser l'humidité relative de l'air.

2.6.2.2. Humidité du support

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 type bombe au carbure : 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 étuve à 105 °C jusqu'à ce que le poids des échantillons prélevés reste constant.

Il existe également des appareils permettant de mesurer directement l'humidité en surface du béton.

Humidité maximale du support en fonction des produits de collage :

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

2.6.2.3. Température de pose

Les plages de températures d'utilisation des colles sont :

- S&P RESIN 220 HP : +8°C à +35°C
- S&P RESIN 230 HP : +8°C à +35°C

2.6.3. Pose

Toutes les séquences et condition de pose sont décrites précisément dans le PAQ du système. Nous donnons ici les points principaux. Pour plus de détail il faut se référer au PAQ.

2.6.3.1. Travaux préparatoires / contrôles de qualité

Les conditions de pose données au point précédent doivent être contrôlées et respectées. Avant la pose, la surface en béton sera débarrassée des particules de poussière par aspiration et contrôlée visuellement.

En plus des précisions du PAQ, du manuel des travaux préparatoires et du manuel d'installation, des schémas des percements nécessaires à l'installation sont donnés en annexe 5.

Avant tout percement, l'entreprise applicatrice doit identifier sur le chantier la position des armatures internes de la structure (il n'est pas suffisant d'utiliser les plans de récolement). La procédure à utiliser sera précisée dans le marché ou indiquée par le maître d'œuvre (pachomètre, géoradar, gammagraphie, etc.).

La position des lamelles S&P C-PreStress (et donc des percements) sera ajustée afin d'éviter l'endommagement des armatures internes. L'entreprise se concertera avec le maître d'œuvre qui validera la position des renforts.

Une attention particulière sera accordée aux structures en béton précontraint. Les armatures passives et actives existantes doivent être identifiées en dimensions et position et reportées sur les plans de ferrailage et de câblage existants dans le dossier de l'ouvrage.

2.6.3.2. 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 (acétone ou équivalent). Outre les impuretés en général, on éliminera 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.

2.6.3.3. Mélange de la résine (S&P Resin 220 HP)

On respectera les instructions de la fiche technique S&P.

Produit	D.P.U.		Humidité du support	Application
	21° C	35° C		
colle epoxy S&P Resin 220 HP	~ 90 min.	~ 60 min.	< 4 %	Températures > 8 °C et < 35 °C

2.6.3.4. 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 ou double encollage sur le support hors poussière. La plaque d'ancrage est également encollée avec la résine 220 HP, préalablement à sa mise en place (frais sur frais).

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

La lamelle en fibres de carbone encollée est fixée sur la surface en béton avec une légère pression de la main. La lamelle est marouflée juste après sa pose (avant la mise en place des platines et du dispositif de mise en précontrainte), avec un rouleau S&P spécialement dédié. Grâce à la très bonne stabilité de la colle époxy S&P Resin 220 HP, il n'est pas nécessaire d'utiliser des accessoires de calage. Lors de la mise en tension de la lamelle la colle sort des 2 côtés. La colle qui a débordé peut-être éliminée à l'aide d'une spatule.

D'éventuels restes de colle à la surface des lamelles sont éliminés avec le produit de nettoyage (acétone ou équivalent) tant que la colle n'a pas durci.

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 HP ou S&P Resin55 HP à l'aide d'une spatule ou d'un rouleau. Frais sur frais, on procédera à une projection de sable de quartz.

Le tableau ci-après donne une consommation indicative de la S&P Resin 220 HP suivant la largeur de la lamelle utilisée :

Largeur de lamelle	Consommation
50 mm	350 g/m
60 mm	450 g/m
80 mm	550 g/m
90 mm	650 g/m
100 mm	700 g/m

2.6.3.6. Mise en place du système de précontrainte S&P

La description des séquences d'application des lamelles précontrainte (goujons ou scellement chimique, colle, plaques d'ancrage, pinces, vérin, etc...) est donnée dans un manuel d'application transféré à l'entreprise applicatrice lors de la formation dispensée à son personnel par S&P Reinforcement France. Le couple de serrage des goujons est donné au §2.6.4.2.

2.6.4. Contrôles

2.6.4.1. Liaison S&P Lamelle S&P C-Laminate, colle et béton

La qualité de la liaison d'un système FRP S&P appliqué revêt une très grande importance. La liaison doit 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 (EN 1542) sur les lamelles S&P C-Laminate **non précontrainte**. Cela implique d'avoir collé des lamelles supplémentaires dédiés à ces essais.

Il est également possible de prévoir des essais SATTEC (EN 1542) pour vérifier à des périodes déterminées la bonne adhérence du système FRP S&P.

La colle est extrudée sur la lamelle par l'outil S&P tire-colle garantissant une quantité de colle homogène le long de la lamelle (cf. §2.6.3.4).

2.6.4.2. Contrôle lors de la mise en tension

Toute éventuelle perte de précontrainte pendant la mise en tension de la lamelle se traduirait par une diminution de charge dans le vérin. De ce fait, le chargé de mise en précontrainte S&P porte une attention particulière sur la cinétique de chargement lue sur le vérin.

A la mise en œuvre de lamelle précontrainte, il procède à un contrôle d'allongement par la mesure du déplacement relatif entre deux points fixes sur la lamelle et sur le béton ou par la pose de jauges de déformation. Ces méthodes de contrôle de l'allongement sont décrites dans le Plan d'Assurance Qualité (cf. §2.13.3).

Le couple de serrage des goujons mécaniques M16 est de 120 N.m selon la fiche technique BOAX-II A4 de Simpson Strong-tie (consulter la documentation technique à jour auprès de l'industriel).

2.6.4.3. Contrôle lors du décintrage

Préalablement au décintrage, un test de dureté Shore D doit être fait sur la Resin 220 HP (échantillon exposé aux conditions climatiques du chantier, dans la même zone de travail). Le décintrage du système est permis si la valeur de dureté shore D obtenue est supérieure ou égale à 70.

La comparaison des déplacements entre le béton et la lamelle près des plaques d'ancrage, de chaque côté de la lamelle, permet de contrôler que le décintrage du système s'est passé dans de bonnes conditions. Cette méthode de contrôle est également donnée dans le Plan d'Assurance Qualité.

Après le décintrage, il convient de s'assurer que la lamelle précontrainte n'ait subi aucun endommagement. Le cas échéant, elle ne sera pas prise en compte dans le dimensionnement.

2.6.4.4. Mesure et suivi de la précontrainte de la lamelle dans le temps

Pour assurer un suivi et une aisance pour la mesure de précontrainte à tout moment, le suivi de l'allongement de vra être réalisé soit à l'aide d'une jauge type jauge SAUGNAC G1.5, soit par la mise en place de deux points fixés sur lamelle à une distance initiale connue L0 (avant mise en précontrainte). Dans les deux cas la valeur de précontrainte est donnée par la relation :

$$N = E \cdot \varepsilon \cdot S$$

Avec :

N l'effort de mise en tension

E le module d'Young de la lamelle

ε l'allongement

S la section de la lamelle

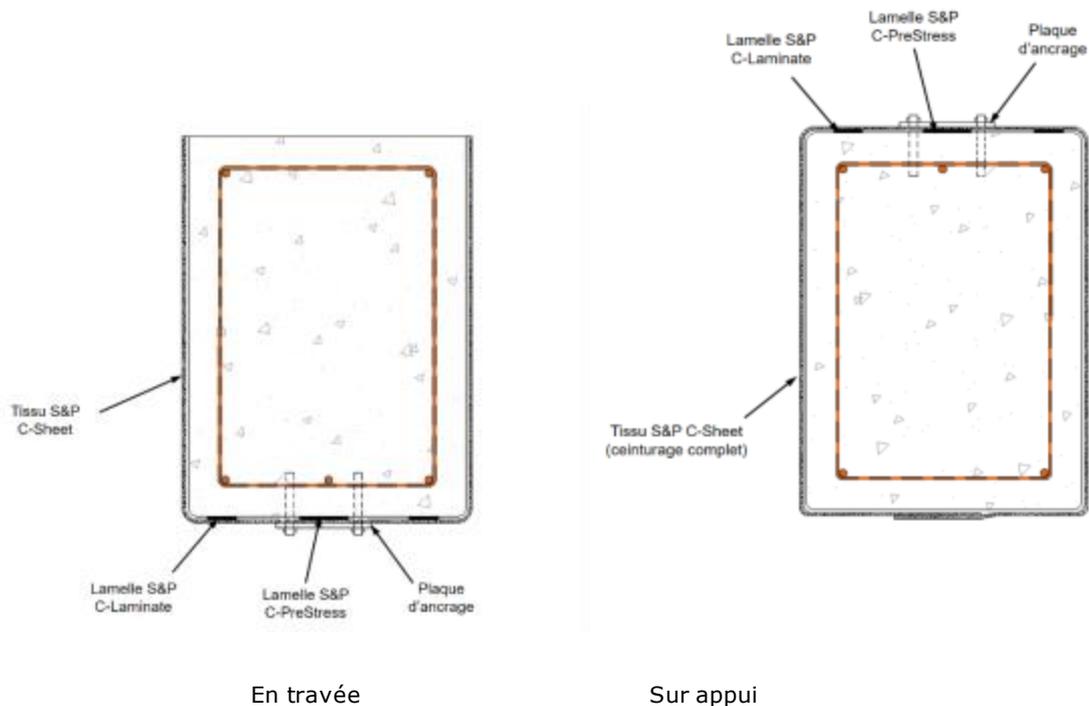
La pose de ces deux points se fera à l'aide d'un adhésif à prise très rapide et d'un gabarit de pose conçu et fabriqué pour cette utilisation. Une colle compatible avec la jauge SAUGNAC doit être utilisée (par exemple colle époxy à prise rapide Araldite® RAPID en biseringue). Dans tous les cas, il convient de se référer à la fiche technique à jour de la jauge (voir www.saugnac-jauges.fr).

2.6.5. Dispositions particulières en cas de pose avec le procédé S&P C-Sheet et/ou S&P C-Laminte

Dans le cas d'un projet couplant la pose du procédé S&P C-PreStress avec le procédé S&P C-Sheet et/ou S&P C-Laminate, la mise en œuvre de ces derniers se fera uniquement après le décintrage du système S&P C-PreStress.

Il n'est pas permis de disposer les tissus S&P C-Sheet ou les lamelles S&P C-Laminate par-dessus ou par-dessous les plaques d'ancrage.

Les schémas ci-dessous donnent deux configurations types qui couvrent l'utilisation du procédé S&P C-PreStress avec le procédé S&P C-Laminate et/ou S&P C-Sheet, en travée et sur appui :



En travée

Sur appui

2.6.6. Protection des éléments de renfort

2.6.6.1. Revêtements de protection

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

Les lamelles S&P C-PreStress (y compris dispositifs d'ancrage) peuvent recevoir une finition, des revêtements destinés à un usage de protection (feu, température, mécanique...) ou à caractère esthétique. Pour les renforcements sur appui disposés dans des zones directement circulables, la mise en œuvre d'un revêtement de protection mécanique est obligatoire, y compris pour les dispositifs d'ancrage (voir Annexe 2.12.6).

Compte tenu de la diversité des produits pouvant satisfaire aux objectifs attendus des éventuels travaux de finition ou de protection, on pourra consulter S&P Reinforcement France quant à l'adéquation du produit en question avec le système S&P C PreStress.

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

Dans tous les cas, il faudra faire un repérage et un marquage des lamelles précontraintes pour ne pas qu'elles soient endommagées après leur pose (lors d'éventuels travaux ultérieurs par exemple).

2.6.6.2. 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 l'Eurocode en prenant en compte uniquement les aciers existants (y compris contrôle de la protection des aciers), aucun dispositif de protection des renforts n'est à prévoir. Les coefficients de sécurité suivants seront pris pour le dimensionnement au feu (cas accidentel) :

- Actions : Eurocode 1, partie 1-2
- Matériaux : Eurocode 2, partie 1-2

Dans le cas contraire, une protection au feu devra être rapportée sur les S&P lamelles S&P C-Laminate précontraintes. Elle devra être menée conformément à l'arrêté du 22 mars 2004 modifié.

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 58°C dans le plan du collage.

En cas d'application d'une protection ignifuge projetée 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 55 HP ou S&P Resin 220 HP, sablée).

Nous rappelons que la réaction au feu est une notion différente de celle traitée dans cet article. Elle devra être évaluée selon la EN 13 501 et la classification de l'édifice en question. Une protection vis-à-vis de ce point est appliquée si nécessaire. Dans certains cas, elle peut être la même que celle de la protection au feu.

2.6.7. Sécurité du travail

Pour la sécurité au travail, il convient de se référer au document « S&P C -PreStress, Plan d'Assurance Qualité », au guide d'application et aux fiches de sécurité des produits. La consultation de ces documents ne dispense pas de recevoir une formation d'application du système par S&P Reinforcement. L'ensemble des règles de sécurité de l'état de l'art et de la législation en vigueur s'appliquent.

2.7. Maintien en service du procédé

La durabilité des éléments renforcés est assurée, exception faite pour les utilisations sous les conditions suivantes :

- Atmosphère chimiquement agressive (nécessité de traitement adéquat suivant le type d'agression, le cas échéant).
- Lorsque la température est susceptible de dépasser les valeurs suivantes : 52°C en pointe et 40°C en continu. Dans ce cas, une protection thermique du renfort est nécessaire (cf. article « Protection des éléments de renfort »).
- Le procédé de renfort S&P C-PreStress sera protégé de l'exposition directe au rayonnement solaire. En cas d'utilisation de lamelles dans des zones exposées à ce phénomène, on doit utiliser un système de protection de surface résistant aux UV, qui est compatible avec les " S&P lamelles S&P C-Laminate " et le béton. Une peinture (exemple : S&P Tecnopint) ou un revêtement de type LHM (exemple : S&P Tecnoimper-Flex) conforme à la EN 1504-2 est conseillé.

En cas d'utilisation du système en extérieur, il sera protégé par :

- Une étanchéité dans le cas de stagnation d'eau (exemple : face supérieure d'une toiture).
- Une imperméabilisation (exemple : S&P Tecnopint ou S&P Tecnoimper-Flex) dans le cas d'une exposition directe aux intempéries sans stagnation d'eau (exemple : renfort vertical en façade)

2.8. Assistante technique

S&P Reinforcement propose une assistance technique lors des différentes phases du projet :

- Phase d'avant-projet (faisabilité).
- Assistance auprès du MOE ou du bureau d'étude pour la conception et le calcul du renforcement.
- Formation des équipes de l'entreprise applicatrice, avec la délivrance d'attestations de formation nominatives.
- Présence sur chantier du chargé de mise en précontrainte S&P selon les termes du Plan d'Assurance Qualité du système S&P C-PreStress.

S&P met à disposition des calculateurs un logiciel de dimensionnement développé en interne. La responsabilité des résultats fournis par le logiciel 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 de celui-ci suivant le cahier des charges fourni, de la définition des hypothèses, des données d'entrée et de l'interprétation des résultats.

L'assistance dispensée par le titulaire (le cas échéant) ne peut engager sa responsabilité dans le projet de quelque manière que ce soit excepté pour la qualité de ses produits. En tant que fabricant, la responsabilité de la qualité des produits commercialisés lui incombe entièrement.

2.9. Principes de fabrication et de contrôle

Les composants du système S&P C -PreStress sont fabriqués suivant des principes industriels différents comme la pultrusion, le process de fabrication de résines et l'usinage de matière.

Le présent Avis Technique fait l'objet d'un suivi des contrôles de caractéristiques des différents composants réalisé dans le cadre de procédures internes d'autocontrôle et d'un contrôle externe une fois par an par le CSTB sur la base du référentiel « Document Technique – Renforcement des structures par collage de matériaux composites » du 22/07/2021.

2.10. Résultats expérimentaux

- Lamelles CFK précontraintes (Dimensionnement et applications), Josef Scherer, S&P Clever Reinforcement Company AG, Suisse 2010
- Vorgespannte CFK-Lamellen zur Verstärkung von Bauwerken, Suter, Jungo, Ecole d'ingénieurs et d'architectes (EIA) de Fribourg, Suisse 2000. Également publié dans la revue spécialisée « Beton - und Stahlbetonbau » 05/2001, Ernst und Sohn, Berlin, Allemagne 2001
- Flexural Strengthening of Real-Scale RC and PRC Beams with End-Anchored Pretensioned FRP Laminates, Pellegrino, Modena, ACI structural journal 2009
- Structural strengthening with a new system of prestressed CFRP strips, Neubauer, vom Berg, Onken, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS -8), Patras, Grèce 2007

- Design Software for Prestressed CFRP Strips, vom Berg, Dabrowski, Scherer, 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE), Zurich, Suisse 2008
- Prüfbericht Nr. 1009/6803 : Zulassungsversuche am Vorspannsystem mit CFK-Lamellen der Firma S&P Clever Reinforcement Company, U. Husemann / A. Gutsch, MPA Braunschweig, Allemagne, 07/2006
- Bericht Nr. 224: Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen, M. Deuring, EMPA Dübendorf, Suisse 1993
- Détermination de l'évolution des déformations d'un composite collée précontraint en fonction du temps, LMC2, Emmanuel Ferrier & Laurent Michel, Juin 2023
- Détermination des caractéristiques mécaniques en cisaillement interlaminaire du composite S&P C -Laminate, LMC2, Emmanuel Ferrier & Laurent Michel, Mars 2022
- Détermination des températures de transition vitreuses des résines (différents tests internes et externes)
- Tests de contrôle qualité des lamelles S&P C-Laminate (essais de traction et de résistance interlaminaire)

2.11. Références chantiers

Le procédé S&P C -PreStress a été appliqué pour la première en France en 2006. Les tableau ci-dessous regroupe quelques références de chantiers.

Désignation du chantier	Année
La Samaritaine – Paris	2016
Magasin Super U - St Sébastien Sur Loire	2016
Tour BCN1 La Défense – Courbevoie	2016
Fac de Médecine – Nancy	2016
CM CIC – (D), (SF) – Schiltigheim	2016
Cabinet dentiste - St Dié des Vosges	2016
Restaurant du Sénat – Paris	2017
Bâtiment Orpéa – (D), (SF) - Rueil Malmaison	2017
Magasin METRO – (Pt), (SF) – Lomme	2019
Centre commercial de la Part-Dieu – (Pt), (SF) – Lyon	2019
Résidence Le Parc Stehelin – (D), (SF) – Bordeaux	2023

(Pt) : renforcement de poutres

(D) : renforcement de dalle

(B) : renforcement de balcon

(SF) : renforcement en sous face

(SA) : renforcement sur appui ou par le dessus de l'élément

2.12. Annexe du Dossier Technique

2.12.1. Annexe 1 : Caractéristiques mécaniques du composite

Tableau 1 : Caractéristiques du composite à la rupture

Types de lamelles	Modules élastique valeur moyenne (GPa)	Module élastique caractéristique (GPa)	Contrainte de traction à la rupture Valeur moyenne (MPa)	Contrainte caractéristique de traction à la rupture (MPa)	Allongement à la rupture (‰)
S&P C - Laminate SM	≥170	≥168	≥2800	≥2700	≥16

Tableau 2 : Caractéristiques du composite à l'ELU

Désignation	Symbole	Unité	S&P C-Laminate SM
Module d'élasticité (valeur de calcul)	E_{fd}	MPa	170 000
Contrainte de dimensionnement à l'ELU	$f_{,ELU}$	MPa	1 700
Allongement de dimensionnement à l'ELU	$\epsilon_{f,ELU}$	‰	10

Tableau 3: Caractéristiques du composite à l'ELS

Désignation	Symbole	Unité	S&P C-Laminate SM
Module d'élasticité (valeur de calcul)	E_{fd}	MPa	170 000
Contrainte de dimensionnement à l'ELS	$f_{,ELS}$	MPa	1 518
Allongement de dimensionnement à l'ELS	$\epsilon_{f,ELS}$	‰	8,9

2.12.2. Annexe 2 : Essais d'adhérence suivant NF EN 1542

Sujet : Adresse : Lieu : Elément de construction :	No. de projet : Date : Personne compétente : Tel. :
---	--

Elément : Colle : Pré conditionnement : Diamètre des rondelles : 50 mm	collé le : Température : °C de l'élément Surface d'adhérence Ao : 1962.5 mm²
--	--

Appareil d'essai d'adhérence:

Eprouvette	Effort de tension	Résistance d'adhérence	Croquis de rupture	B:	Béton
No.	F [kN]	f [N/mm ²]		C:	Colle
				FRP:	Lamelle, SHEET, etc.
1			Rupture:		
2			Rupture:		
3			Rupture:		
4			Rupture:		
5			Rupture:		
6			Rupture:		
7			Rupture:		
8			Rupture:		
9			Rupture:		

Tampon, Signature:

2.12.3. Annexe 3 : Fiches d'autocontrôle

2.12.3.1. Contrôles des températures et de l'humidité

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: $8^{\circ} < t^{\circ} < 30^{\circ}\text{C}$

>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:					
No. de charge de la colle :					

Tampon, Signature:

2.12.3.2. Contrôles du matériel et de la mise en œuvre du procédé

Une fiche d'autocontrôle spécifique à la mise en œuvre du procédé est à disposition de l'apporteur. Son utilisation est obligatoire. Un extrait mentionnant des points de contrôle est donné ci-après.

Conformité générale	OUI	NON (si "non", remplir la partie inférieure)
Mise en place du vérin	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme
Verrouillage du vérin	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme
Mise en place collerette aluminium	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme
Mise en tension jusqu'à la valeur objectif	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme
Allongement suivi par lecture de déplacement relatif	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Allongement suivi par jauge SAUGNAC G1.5	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Allongement suivi par jauge de déformation électronique	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Vérification de l'allongement	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme
	Valeur attendue :	
	Valeur lue :	
Allègement de la charge par les vis calantes	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme
Déchargement progressif	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme
Dépose du vérin	<input type="checkbox"/> Conforme	<input type="checkbox"/> Non Conforme

2.12.4. Annexe 4 : 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 de point de rosée 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.

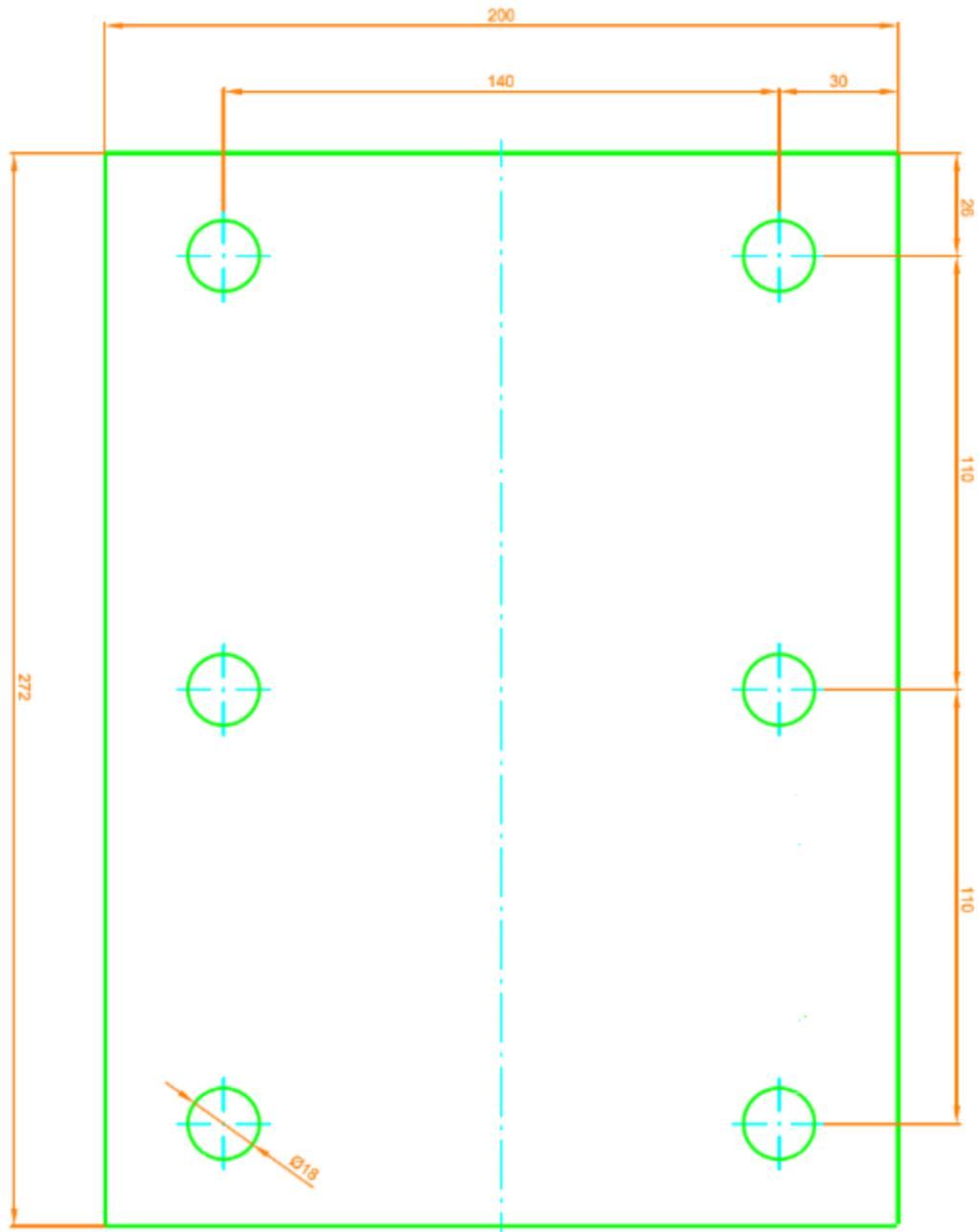
2.12.5. Annexe 5 : Schéma de la platine d'ancrage et schéma des percements nécessaires à l'installation**Schéma de la platine**

Schéma des percements nécessaires à l'installation

Légende :

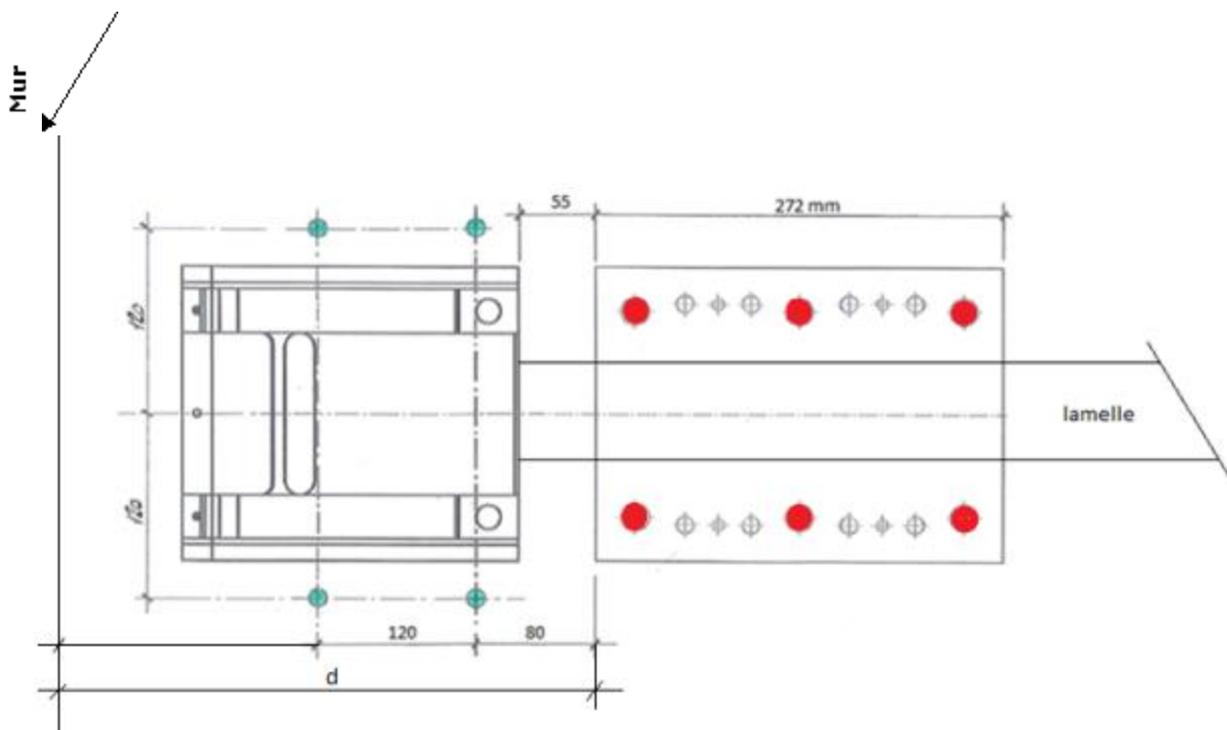
 Percement Ø 16mm par forage sans percussion

 Percement Ø 12 mm par forage sans percussion ou en roto-percussion

Ancrage fixe :

Plaque d'ancrage définitive

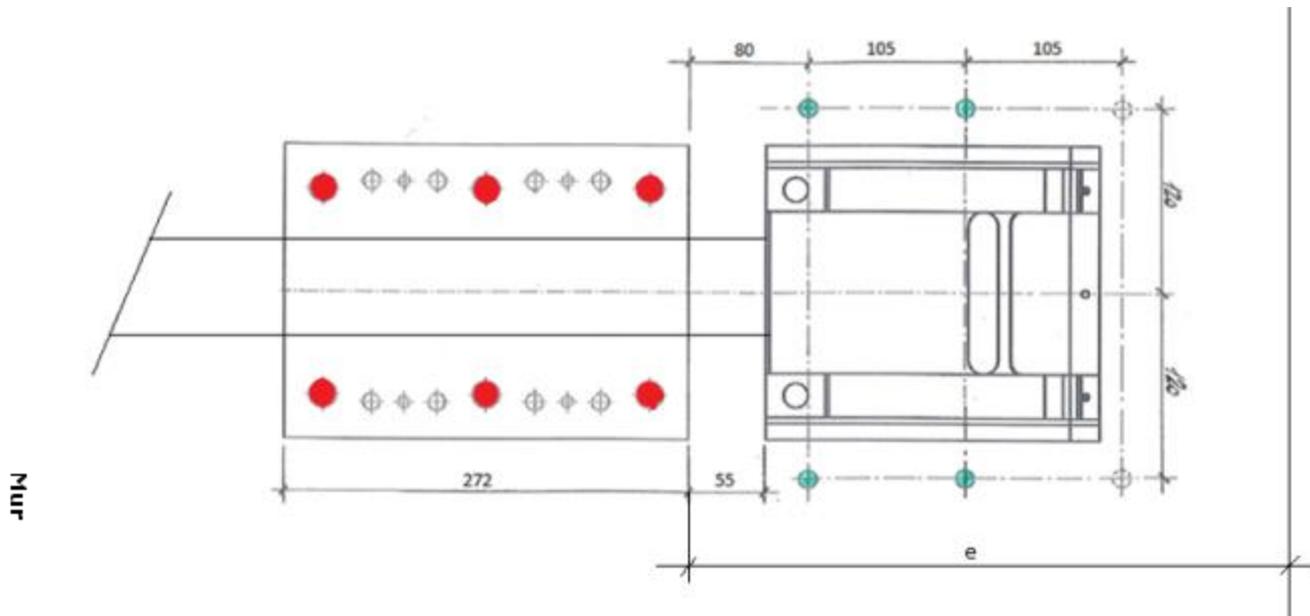
 Cosse de serrage ou pince de serrage



Ancrage mobile :

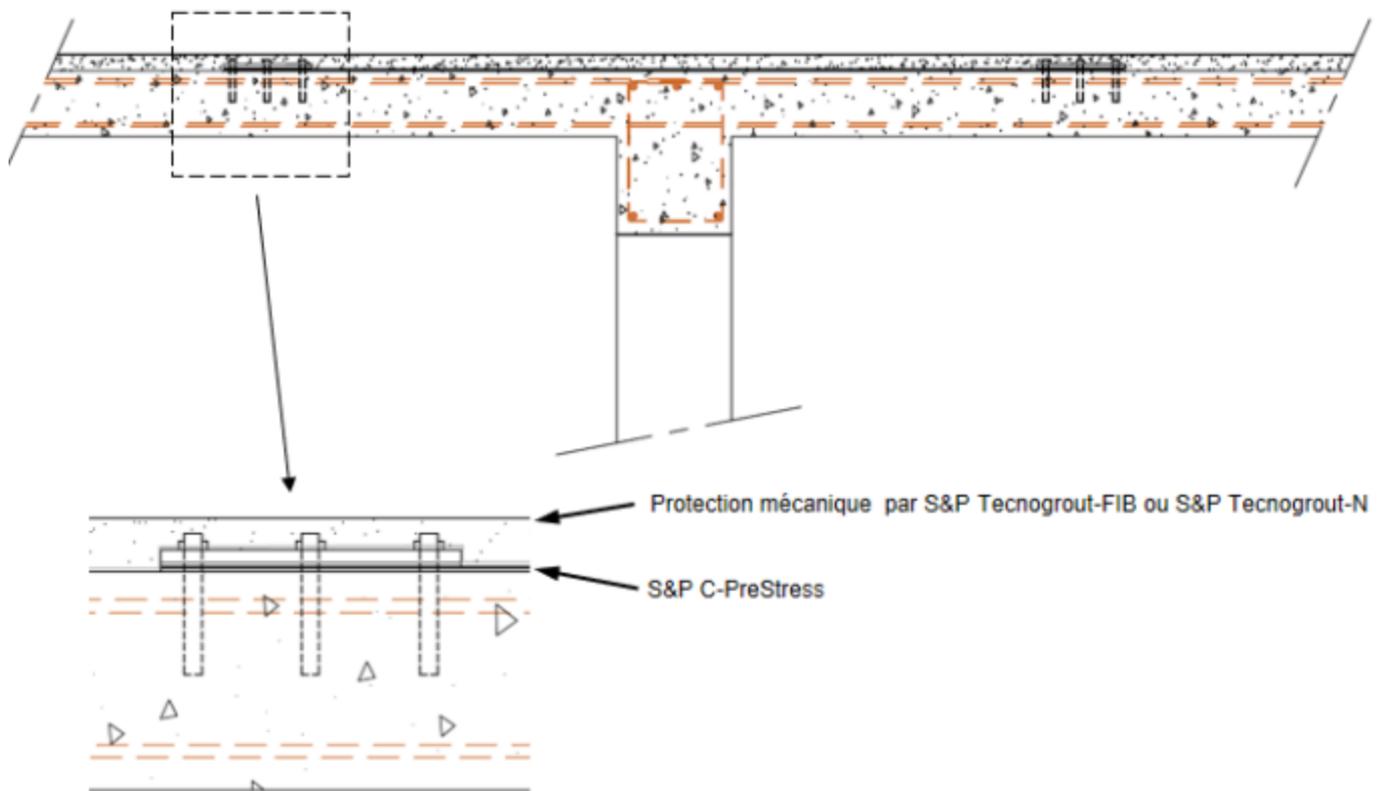
Cosse de serrage ou
pince de serrage

Plaque d'ancrage
définitive



2.12.6. Annexe 6 : Mise en œuvre du procédé S&P C-PreStress sur appui dans les zones accessible aux personnes

Schéma de principe



Mise en œuvre

Option 1 :

1. Mise en œuvre du S&P C-PreStress
2. Création d'une couche d'accroche (résine + sable)
3. Protection par couche de S&P Tecnogrout-FIB ou S&P Tecnogrout-N
 - a. Circulation piétonne : min. 3 cm d'épaisseur

Option 2 :

1. Décaissement de béton d'enrobage sans mise à nu des aciers et en gardant une épaisseur min. de 2 cm
 - a. Sondage préalable de l'épaisseur de l'enrobage
 - b. Méthode permettant de maîtriser l'épaisseur : raboteuse/fraiseuse de sol (pas de burineur)
2. Mise en œuvre du S&P C-PreStress
3. Création d'une couche d'accroche (résine + sable)
4. Protection par couche de S&P Tecnogrout-FIB ou S&P Tecnogrout-N
 - a. Circulation piétonne : min. 3 cm d'épaisseur