

APPRECIATION TECHNIQUE D'EXPERIMENTATION

Numéro de référence CSTB : 2885_V1

ATEx de cas a

Validité du 26/02/2021 au 26/02/2023



Copyright : S&P Reinforcement France

L'Appréciation Technique d'expérimentation (ATEx) est une simple opinion technique à dire d'experts, formulée en l'état des connaissances, sur la base d'un dossier technique produit par le demandeur. *(extrait de l'art. 24)*

A LA DEMANDE DE :

S&P Reinforcement France

137 ZA LES MOUGUES

30350 CARDET

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 2885_V1

Note Liminaire : Cette Appréciation porte essentiellement sur le procédé de renforcement des structures en béton armé ou en béton précontraint par collage de lamelles pultrudées en carbone.

Selon l'avis du Comité d'Experts en date du 26/02/2021, le demandeur ayant été entendu, la demande d'ATEX ci-dessous définie :

- Demandeur : Société S&P Renforcement France
- Technique objet de l'expérimentation :
 - Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller sur la surface des éléments visés des lamelles pultrudées en fibres de carbone (S&P C-PreSTress) à l'aide d'une résine époxydique, précontraintes et ancrées à leurs extrémités par des plaques métalliques.

Cette technique est définie dans le dossier enregistré au CSTB sous le numéro ATEX 2885_V1 et résumé dans la fiche sommaire d'identification ci-annexée,

donne lieu à une :

APPRECIATION TECHNIQUE FAVORABLE A L'EXPERIMENTATION

Remarque importante : Le caractère favorable de cette appréciation ne vaut que pour une durée limitée au **23 février 2023**, et est subordonné à la mise en application de l'ensemble des recommandations formulés au §4.

Cette Appréciation, QUI N'A PAS VALEUR D'AVIS TECHNIQUE au sens de l'Arrêté du 21 mars 2012, découle des considérations suivantes :

1°) Sécurité

1.1 – Stabilité des ouvrages et/ou sécurité des équipements

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 conforme à la norme NF EN 1504-4 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.

Le dimensionnement des renforts est réalisé conformément aux règles AFGC et à la norme NF EN 1992-1-1.

Des essais ont été réalisés sur les différents procédés, afin de vérifier la conformité de ces derniers vis-à-vis des règles précitées.

1.2 – Sécurité des intervenants

La sécurité des intervenants est considérée comme normalement assurée moyennant l'utilisation des dispositifs de manutention et le respect des prescriptions décrites dans le dossier technique et les recommandation AFGC.

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.

1.3 – Sécurité en cas d'incendie

En ce qui concerne la résistance au feu, le système 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.

1.4 – Sécurité en cas de séisme

Les utilisations pour lesquelles l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié impose l'application des règles parasismiques ne sont pas visées dans le cadre de la présente ATEX.

2°) Faisabilité

Le présent document comporte 4 pages dont deux annexes ; il ne peut en être fait état qu'in extenso.

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 2885_V1

2.1 – Production

Le procédé S&P C-PreStress est fabriqué par une usine spécialisée au Portugal. La fabrication des lamelles, font l'objet d'un plan d'assurance-qualité. Chaque lot livré au titulaire fait l'objet d'essais de contrôle interne portant notamment sur : le module d'élasticité, la densité et l'allongement à la rupture chaque 600 m de lamelles.

La colle utilisée pour le système est une résine époxydique à deux composants fabriquée spécialement pour l'usage défini dans le dossier examiné par des usines de S&P en Allemagne et en Autriche. Les résines bénéficient d'un marquage CE conformément à la norme NF EN 1504-4.

Les plaques d'ancrages et les goujons de fixation sont fabriqués par la société Simpson Strong Tie.

2.2 – Mise en œuvre :

La mise en œuvre du procédé nécessite un personnel formé spécialement au renforcement par collage de lamelles. Un plan d'assurance qualité pour chaque chantier a été établi et intègre les éléments techniques spécifiques des procédés (vérification par pastillage, condition des supports, tolérances, détails des points singuliers).

La mise en œuvre doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans le dossier technique établi par le demandeur, notamment en ce qui concerne le nettoyage et la préparation des supports ainsi que la réalisation des essais de convenances sur ce dernier.

2.3 – Assistance technique

La conception et le calcul des renforcements sont à la charge du Bureau d'Études Techniques formé par le service d'assistance technique de S&P Renforcement France ou par le bureau d'études S&P. Leur service d'assistance technique fournit sur demande une assistance technique en phase de conception et de préparation à l'exécution du procédé. Un logiciel de dimensionnement du procédé S&P C-PreStress est tenu à disposition des bureaux d'études.

3°) Risques de désordres

Une attention particulière doit être apportée sur la mise en œuvre des lamelles actives, notamment au niveau de la mise en place des plaques d'ancrage, qui permet d'assurer le bon fonctionnement de la précontrainte et lors de la mise en œuvre de la résine pour assurer la bonne adhérence entre les deux matériaux.

4°) Recommandations

Il est recommandé de :

- Réaliser les essais de pastillages avant et après renforcement afin de valider l'adhérence entre les différents matériaux ;
- Fournir pour chaque chantier une fiche d'auto-contrôle précisant notamment les conditions de réticulation qui sont fondamentales pour le bon fonctionnement du procédé ;
- Vérifier la déformation (raccourcissement) des lamelles aux extrémités après relâchement des vérins ;
- Prévoir une perte égale à 10% de l'allongement dans le calcul de dimensionnement de la précontrainte ;
- Dans le cadre de la vérification de l'ancrage de l'armature de flexion à l'appui, de prendre en considération l'angle d'inclinaison des bielles ou un effort à ancrer égal à $1,25.V_{ed}$.

EN CONCLUSION

En conclusion et sous réserve de la mise en application des recommandations et attendus ci-dessus, le Comité d'Experts considère que :

Conclusion FAVORABLE

- La sécurité est *assurée*,
- La faisabilité est, *réelle*,
- Les désordres sont *minimes*.

Champs sur Marne,
Le Président du Comité d'Experts,



Ménad CHENAF

ANNEXE 1

FICHE SOMMAIRE D'IDENTIFICATION (1)

Demandeur : Société **S&P Reinforcement France**
137 ZA LES MOUGUES
30350 CARDET

Définition de la technique objet de l'expérimentation :

- Le procédé faisant l'objet de l'ATEX consiste à coller sur la surface des éléments visés des lamelles précontraintes à l'aide d'une résine époxydique et de plaques métalliques à ses extrémités, fixées dans le béton à l'aide des goujons. Ce procédé est destiné à augmenter la capacité portante des éléments concernés, par fonctionnement mécanique conjoint lamelle/structure béton, grâce à l'adhérence conférée par la résine après son durcissement, entre les deux matériaux. La transmission de l'effort de précontrainte à la structure se fait à l'extrémité des lamelles par des goujons et des plaques métalliques ;
- Le procédé est utilisé pour le renfort de poutres ou de dalles à la flexion ;
- La technique consiste d'abord en une préparation du support par nettoyage, ponçage et rainurage dans certain cas, puis de l'imprégnation proprement dite ;
- Un ragréage ou reprofilage préalable est opéré si nécessaire. Ensuite, il est procédé à la mise en place des bandes de S&P C-PreStress. Des contrôles sont effectués tout au long du processus : contrôles préalables, en cours de mise en œuvre, et finaux ;
- Les lamelles utilisées dans le procédé S&P C-PreStress, sont des lamelles pultrudées à matrice époxy ;
- Le dimensionnement du renforcement proposé est justifié par une note de calculs prenant en compte les caractéristiques mécaniques des matériaux et les pertes de précontrainte. Pour les colles, ces caractéristiques sont vérifiées par des contrôles sur des prélèvements et tests ;
- Un essai de pastillage est obligatoire, pour déterminer la contrainte de cisaillement dans le béton. Le procédé n'est pas applicable si les essais de pastillage donnent une contrainte inférieure à 1.5 MPa.

(1) La description complète de la technique est donnée dans le dossier déposé au CSTB par le demandeur et enregistré sous le numéro ATEx 2885_V1 et dans le cahier des charges de conception et de mise en œuvre technique (cf. annexe 2) que le fabricant est tenu de communiquer aux utilisateurs du procédé.

ANNEXE 2

CAHIER DES CHARGES DE CONCEPTION ET DE MISE EN OEUVRE

Ce document comporte 4 pages.

Procédé de S&P C-PreStress

« Dossier technique établi par le demandeur »

Version tenant compte des remarques formulées par le comité d'Experts

Datée du 26/02/2023

A été enregistré au CSTB sous le n° d'ATEX 2885_V1.

Fin du rapport



A Simpson Strong-Tie® Company

Appréciation Technique d'Expérimentation « S&P C-PreStress »

DOSSIER TECHNIQUE

Mars 2021

SOMMAIRE

1	DESCRIPTION	4
1.1	DÉFINITION	4
1.2	PRINCIPE DU PROCÉDÉ	4
1.3	PROTECTION ET AGRÉMENTS EXISTANTS	5
1.4	COMPOSANTS DU SYSTÈME	5
1.5	MAIN D'ŒUVRE SPÉCIFIQUE NÉCESSAIRE AU SYSTÈME	5
1.5.1	<i>Personnel de l'entreprise applicatrice</i>	5
1.5.2	<i>Chargé de mise en précontrainte S&P</i>	6
1.6	DOMAINES D'EMPLOI	6
1.6.1	<i>Domaines d'emploi acceptés</i>	6
1.6.2	<i>Types de charges</i>	6
1.6.3	<i>Zones géographiques d'utilisation</i>	6
1.6.4	<i>Durabilité</i>	7
1.7	DESCRIPTION DES MATÉRIAUX	7
1.7.1	<i>Lamelles S&P C-Laminate</i>	7
1.7.2	<i>S&P Resin 220 HP : Colle pour lamelles S&P C-Laminate</i>	8
1.7.3	<i>Dispositif d'ancrage pour les lamelles précontraintes</i>	8
1.7.4	<i>S&P Resin 230 HP : Mortier de reprofilage des supports</i>	9
2	DIMENSIONNEMENT	9
2.1	LOGICIEL DE DIMENSIONNEMENT	9
2.2	COMPORTEMENT DU RENFORT FRP	9
2.2.1	<i>Notations</i>	9
2.2.2	<i>Hypothèses de calcul</i>	10
2.2.3	<i>Caractéristiques du matériau FRP</i>	11
2.2.4	<i>Mise en précontrainte des lamelles FRP</i>	11
2.3	RENFORCEMENT EN FLEXION DU BÉTON ARMÉ ET PRÉCONTRAIT	11
2.3.1	<i>Principe de dimensionnement</i>	12
2.3.2	<i>Allongement limite du FRP</i>	13
2.3.3	<i>État limite ultime</i>	14
2.3.4	<i>État limite de service</i>	14
2.3.5	<i>Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP</i>	14
2.3.6	<i>Éléments en béton précontraint</i>	15
2.3.7	<i>Règles constructives</i>	16
3	APPLICATION	16
3.1	SUPPORT	16
3.1.1	<i>Qualité du support</i>	16
3.1.2	<i>Injection des fissures</i>	16
3.1.3	<i>Vérification de la qualité et de la planéité du support</i>	17
3.1.3.1	<i>Détermination de la résistance à la traction du support</i>	17
3.1.3.2	<i>Planéité de la surface de béton préparée</i>	17
3.1.3.3	<i>Contre flèche et structures concaves</i>	17
3.1.4	<i>Préparation mécanique du support</i>	18
3.2	CONDITIONS DE POSE	18

3.2.1	Détermination du point de rosée	18
3.2.2	Humidité du support	18
3.2.3	Température de pose	19
3.3	POSE.....	19
3.3.1	Travaux préparatoires / contrôles de qualité.....	19
3.3.2	Nettoyage / préparation des Lamelles S&P C-Laminate	19
3.3.3	Mélange de la colle à base de résine (S&P Resin 220 HP).....	19
3.3.4	Application de la colle	20
3.3.5	Collage des S&P Lamelles S&P C-LAMINATE sur le béton	20
3.3.6	Mise en place du système de précontrainte S&P	20
3.4	CONTRÔLE	20
3.4.1	Liaison S&P Lamelle S&P C-Laminate, colle et béton	20
3.4.2	Contrôle lors de la mise en tension	20
3.4.3	Contrôle lors du décintrage.....	21
3.4.4	Mesure et suivi de la précontrainte de la lamelle dans le temps	21
4	PROTECTION DES ÉLÉMENTS DE RENFORT.....	21
4.1	REVÊTEMENTS DE PROTECTION.....	21
4.2	PROTECTION AU FEU	21
4.3	PROTECTION À LA TEMPÉRATURE (EN SERVICE)	22
5	SÉCURITÉ DU TRAVAIL	22
6	ANNEXES	22

Préambule

Le présent dossier technique du système dit « S&P C-PreStress » est indissociable de son Plan d'Assurance Qualité et de ses annexes, détaillant entre autres les points de vigilance à avoir sur le chantier, les travaux de préparation du support et le schéma organisationnel préconisé in-situ.

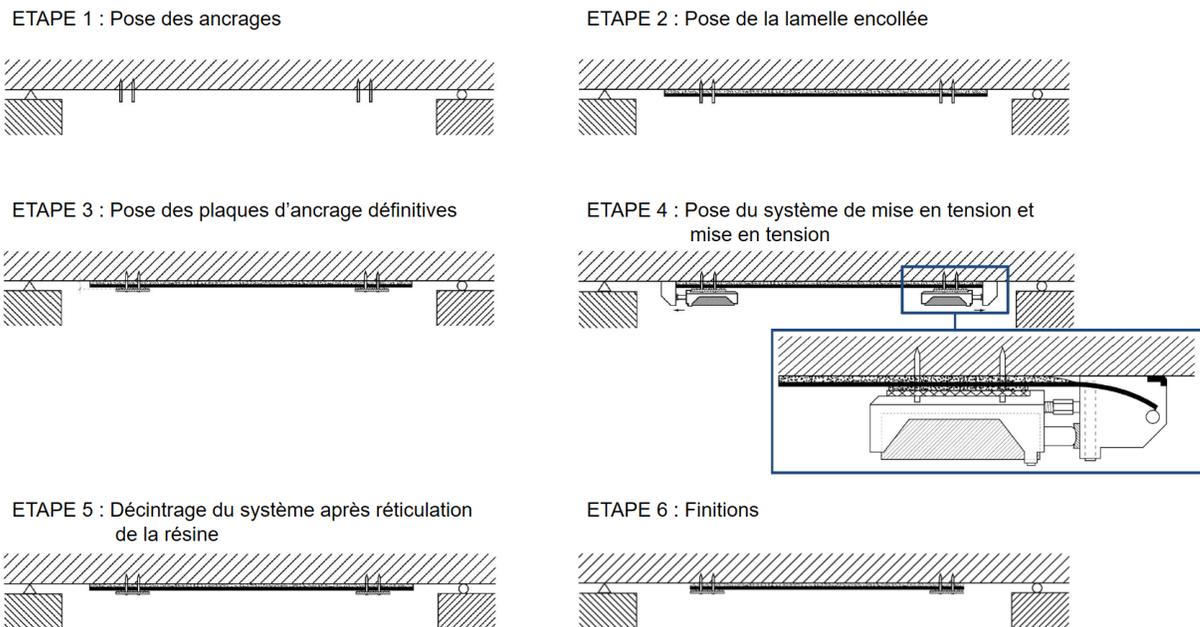
1 Description

1.1 Définition

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 principalement transmis ponctuellement à la structure par les points d'ancrage aux extrémités. Le joint de résine le long de la lamelle est sollicité par les charges d'exploitation.

1.2 Principe du procédé

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 goulons 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 de précontrainte. 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 opposé 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.

1.3 Protection et agréments existants

Le système de « S&P C-PreStress » est protégé par un brevet européen : N°EP 2088259B.

Le système de renforcement S&P avec des lamelles passives en fibres carbone et/ou des tissus en fibres de carbone est présent en France depuis plus de 15 ans. Les produits S&P sont présents dans l'avis technique du CSTB suivant : Système « S&P C-Laminate » de S&P Reinforcement France (n°3.3/19-990_V1).

1.4 Composants du système

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
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 présent document est un document technique qui couvre la partie conception et dimensionnement.

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.

1.5 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.

1.5.1 *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. paragraphe 3.4.1 du Plan d'Assurance Qualité pour plus de détail).

1.5.2 *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. 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.

1.6 Domaines d'emploi

1.6.1 *Domaines d'emploi acceptés*

Le procédé FRP S&P permet le renforcement structural d'éléments en béton armé et béton précontraint par collage et ancrage mécanique de pièces en carbone sur la structure en cas d'augmentation des charges d'exploitation de l'ouvrage ou de malfaçon (ferraillage insuffisant, mal positionné, ...). Le système a les mêmes avantages qu'une précontrainte extérieure :

- Augmentation de la résistance
- Diminution des déformations
- Diminution de la fissuration du béton
- Diminution des phénomènes de fatigue

Exemples d'application :

- Renforcement de poutres et planchers de bâtiments d'habitations, bâtiments administratifs, bureaux, bâtiments industriels, ...
- Renfort de trémies
- Renfort de tabliers de pont
- Ceinturage de canalisation ou de silo

Les domaines d'emplois principaux sont :

- La réparation de structures dégradées, pour la restitution de la résistance et/ou de la flèche initiale.
- Le renforcement de structures, pour l'obtention d'une résistance supérieure à la résistance initiale et/ou d'une déformation inférieure à la déformation initiale.
- Une mise en conformité des bâtiments, des ouvrages de génie civil, des ouvrages industriels... en cas de changement de destination.
- Une réduction de la sollicitation dans les aciers afin de diminuer le phénomène de fatigue

1.6.2 *Types de charges*

L'utilisation du système est autorisée pour les charges statiques ou dynamiques et répétitives pouvant entraîner de la fatigue.

1.6.3 *Zones géographiques d'utilisation*

L'utilisation du système est autorisée en France européenne (métropole et Corse).

1.6.4 Durabilité

La durabilité des éléments renforcés est normalement assurée, exception faite pour les utilisations sous les conditions 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 Resin220 HP et S&P Resin230 HP : 52°C en pointe et 40°C en continu.

1.7 Description des matériaux

1.7.1 Lamelles S&P C-Laminate

Les lamelles S&P C-Laminate 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. Ce sont les mêmes lamelles qui sont utilisées pour les renforcements passifs.

IDENTIFICATION ET MARQUAGE :

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 sur la face vue (face non encollée).
Le numéro de lot est apposé sur chaque rouleau.

Contrôles :

- Chaque rouleau d'un lot fait l'objet d'un contrôle du module d'élasticité
- Un échantillonnage est testé à la rupture en traction

Pour plus d'informations sur la qualité, voir le document « Plan d'Assurance Qualité »

Les lamelles SM de largeurs 50 mm, 60 mm, 80 mm, 90 mm et 100 mm peuvent être précontraintes. Les lamelles plus larges ne peuvent pas être précontraintes. Le tableau ci-dessous présente les références des lamelles pouvant être précontrainte.

Type de lamelles	Section	Effort de traction maximum pour un allongement de
S&P C-Laminate SM Résistance à la traction: > 2 700 N/ mm ² Module d'élasticité: > 170 kN/mm ²	[mm ²]	Effort en tension $\epsilon = 0.1 \%$ 1 700 N/mm²
50 / 1.2	60	102.0 kN
50 / 1.4	70	119.0 kN
60 / 1.4	84	142.8 kN
80 / 1.2	96	163.2 kN
80 / 1.4	112	190.4 kN

90 / 1.4	126	214.2 kN
100 / 1.2	120	204.0 kN
100 / 1.4	140	238.0 kN

- Masse volumique : 1.6 g/cm³
- Résistance à la traction transversale des lamelles : 25 MPa
- Taux de fibre : min. 68%
- Transition vitreuse de la matrice époxy >100°C

1.7.2 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 sur le support (marquage CE suivant EN 1504-4).

IDENTIFICATION

- Densité : env. 1,6 g/cm³
 - Epaisseur d'application : de 1 à 3 mm
 - Durée Pratique d'Utilisation : env. 90 min à 21 c°
 - Délai de durcissement total : env. 7 jours *
 - Température d'application : de +8° C à 35° C
 - Résistance à la traction sur béton : > 3,0 N/mm² (rupture dans le béton)
 - Résistance à la traction sur acier : > 15 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

Consommation selon la rugosité et l'état (planéité) du support de béton (valeurs minimales).
Lamelles S&P C-Laminate collées

Largeur de lamelle	Consommation de S&P Resin 220 HP
50 mm	~ 240 g/ml
60 mm	~ 290 g/ml
80 mm	~ 385 g/ml
90 mm	~ 435 g/ml
100 mm	~ 480 g/ml

1.7.3 Dispositif d'ancrage pour les lamelles précontraintes

Toutes les informations concernant les matériaux, les dimensions des plaques aluminium et les pinces de précontrainte, sont données dans le PAQ du système S&P C-PreStress.

1.7.4 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. Les conditions à satisfaire concernant la planéité du support sont données dans le paragraphe 3.1.3.2 de ce document.

- Densité : env. 2,05 kg/l
 - Durée Pratique d'Utilisation : env. 90 mn à 20°C.
 - Délai de durcissement total : env. 7 jours *
 - Température d'application : de +8° C à 35° C
 - Humidité du support à l'application : < 4%
 - Résistance à la traction sur béton : > 3,0 N/mm² (rupture dans le béton)
 - Epaisseur d'application : 50 mm par couche
- * à 20° C et 65 % d'humidité relative

2 Dimensionnement

2.1 Logiciel de dimensionnement

Le dimensionnement du renforcement en lamelles S&P C-Laminate précontraintes doit être réalisé par un bureau d'étude de structure formé à cette technique ou par l'équipe d'ingénieurs S&P. 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.

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.

2.2 Comportement du renfort FRP

2.2.1 Notations

Matériau FRP

E_{fu}	Module d'élasticité moyen du matériau FRP (valeur moyenne)
E_{fk}	Module d'élasticité caractéristique du matériau FRP (valeur minimum)
ϵ_{fu}	Allongement moyen à la rupture du matériau FRP (valeur moyenne)
ϵ_{fk}	Allongement caractéristique à la rupture du matériau FRP (valeur minimum)
$\epsilon_{f,limit}$	Allongement limite du matériau FRP (allongement de dimensionnement)
ϵ_{fp}	Allongement des lamelles pour la mise en précontrainte
f_{fu}	Contrainte moyenne de rupture à la traction du matériau FRP (contrainte moyenne de rupture)

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

2.2.2 *Hypothèses de calcul*

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

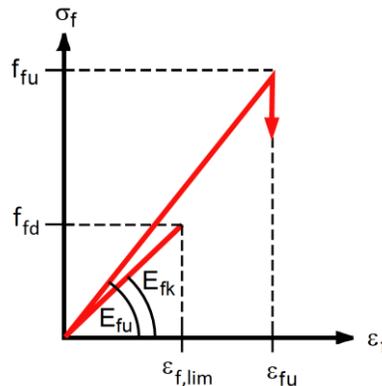
- Pour le dimensionnement en flexion on admet que les sections droites restent planes après déformation (hypothèse de Bernoulli).
- Une contribution de la résistance à la traction du béton n'entre pas en considération. Toutes les forces de traction nécessaires à l'équilibre interne sont reprises par 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.

2.2.3 Caractéristiques du matériau FRP



Le matériau FRP a un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture. Les valeurs suivantes sont garanties :

Lamelle S&P C-LAMINATE SM $E_{fk} = 170'000$ [N/mm²] $\varepsilon_{fk} = 15,0$ [‰]

2.2.4 Mise en précontrainte des lamelles FRP

Les lamelles FRP peuvent être précontraintes avant le durcissement de la colle jusqu'à un allongement ($\varepsilon_{fp,limit}$) 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.

Des essais d'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.

2.3 Renforcement en flexion du béton armé et précontraint

Dans le système S&P C-PreStress, une éventuelle perte de précontrainte de l'ordre de 10% de l'allongement (ε_{fp}) est à prendre en considération. 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 et la vérification de l'ancrage est effectuée sans prise en compte de perte de précontrainte (cas le plus défavorable).

Concrètement, deux notes de calcul doivent être produites : une note de calcul à $t=0$ considérant 100% de l'allongement (ϵ_{fp}) et une deuxième considérant une perte éventuelle de précontrainte estimée à 90% de l'allongement (ϵ_{fp}).

2.3.1 Principe de dimensionnement

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

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

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

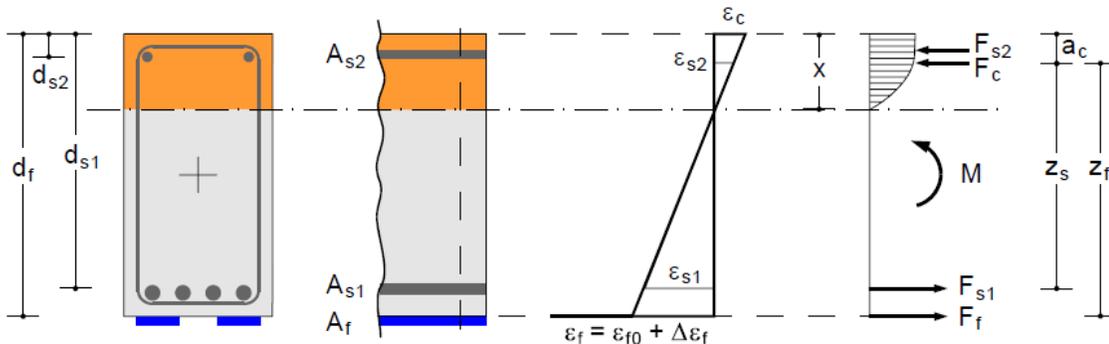
Béton $F_c = b \cdot \alpha_R \cdot x \cdot \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$ (4)
(α_R : paramètre de courbe parabolique)

Conditions d'équilibre

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

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

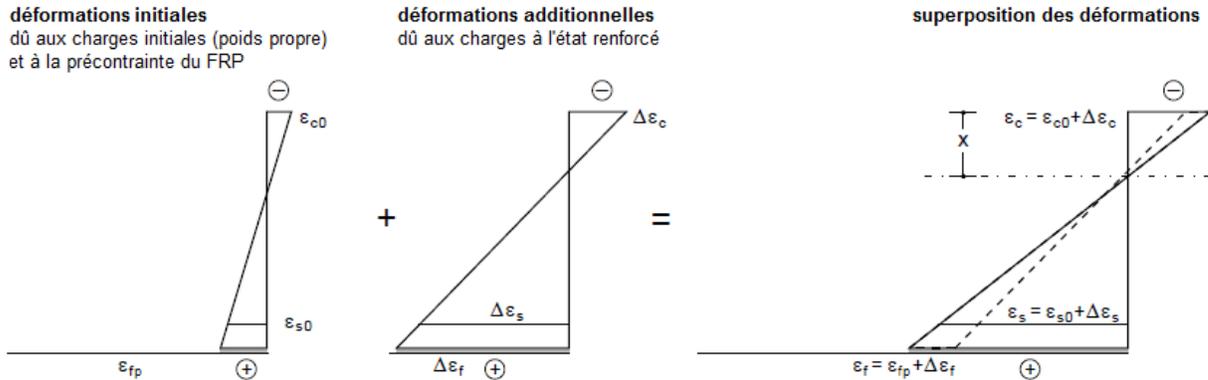
La résolution des conditions d'équilibre s'effectue itérativement en variant les allongements dans la zone comprimée et la zone tendue. La satisfaction de ces conditions est testée à chaque itération jusqu'à la résolution des équations d'équilibre.



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 dû à l'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. Pour l'allongement total il faut respecter la condition suivante :

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



2.3.2 Allongement limite du FRP

Au contraire des lamelles S&P C-Laminate passives collées superficiellement, 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.

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

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

L'adhérence de la lamelle S&P C-Laminate n'est sollicitée que par l'allongement supplémentaire dû aux charges. Cela correspond à la sollicitation lors d'un renforcement avec des lamelles collées passives. 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 $\Delta\epsilon_{f,limit} = 6,0 \text{ [\%]}$

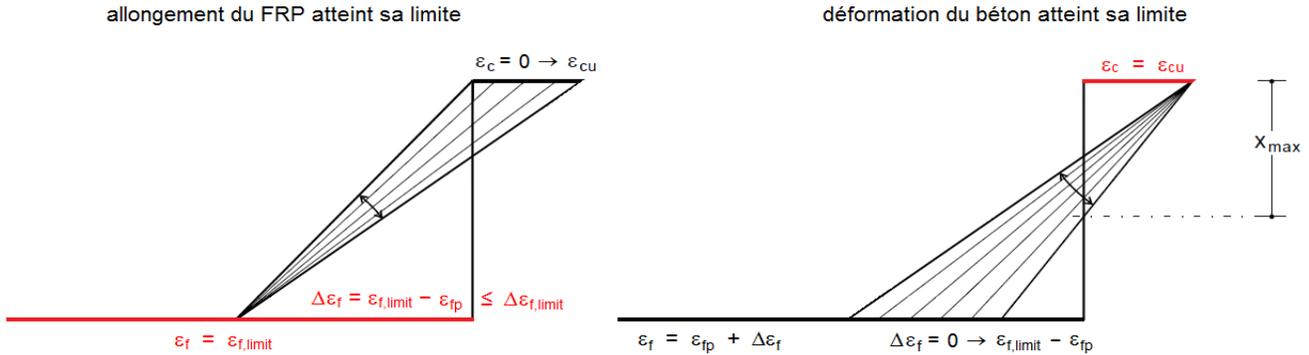
Les limitations d'allongement des lamelles S&P C-Laminate sont résumées ci-dessous. Elles doivent toutes être satisfaites.

$$\begin{aligned} \epsilon_f &= \epsilon_{fp} + \Delta\epsilon_f \leq \epsilon_{f,limit} \\ \epsilon_{fp} &\leq \epsilon_{fp,limit} \\ \Delta\epsilon_f &\leq \Delta\epsilon_{f,limit} \end{aligned}$$

Les deux valeurs ϵ_{fp} et $\Delta\epsilon_f$ 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 $\Delta\epsilon_f$ et des paramètres du projet de renforcement.

2.3.3 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. Si au contraire la zone comprimée du béton est très fortement exploitée, un renfort FRP n'est souvent pas judicieux.



La précontrainte des lamelles réduit les allongements des aciers internes. Pour assurer une ductilité suffisante de l'élément, il faut respecter les limites données par l'Eurocode 2 pour la hauteur de la zone de compression du béton comme suit :

$$\text{béton} \leq \text{C34/45} \quad x_{\max} = 0,45 d_s \quad (10)$$

$$\text{béton} > \text{C34/45} \quad x_{\max} = 0,35 d_s \quad (11)$$

Pour les systèmes FRP collées en surface (passives), la sollicitation agissante sur l'élément renforcé ne doit pas être plus grande que 1,59 fois celle de la capacité résistante de l'élément non renforcé. Cela s'exprime par le degré de renforcement à la flexion, défini comme suit :

$$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 1,59 \quad (12)$$

Pour les systèmes précontraints cette limite peut être montée jusqu'à 3. Cela s'exprime par le degré de renforcement à la flexion, défini comme suit :

$$\eta_{MP} = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 3$$

2.3.4 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 et les aciers que pour la section FRP choisie, sont déterminées et comparées aux limites données par l'Eurocode 2

2.3.5 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'aluminium collées et goujonnées. Cet ancrage est sollicité principalement par la force de longue durée de la précontrainte F_{fp} de la lamelle. Il y a en outre un surcroît de force de traction ΔF_{fd} causé par la sollicitation flexionnelle de l'élément. Cette force de traction ΔF_{fd} est déterminée par une itération de l'équilibre à partir du moment donné au point E.

$$F_{fd,E} = F_{fp} + \Delta F_{fd} \quad (13)$$

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 $F_{fd,E}$ des lamelles FRP à l'extrémité de la construction d'ancrage (au point E).

$$F_{ad} \geq F_{fd,E} \quad (14)$$

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

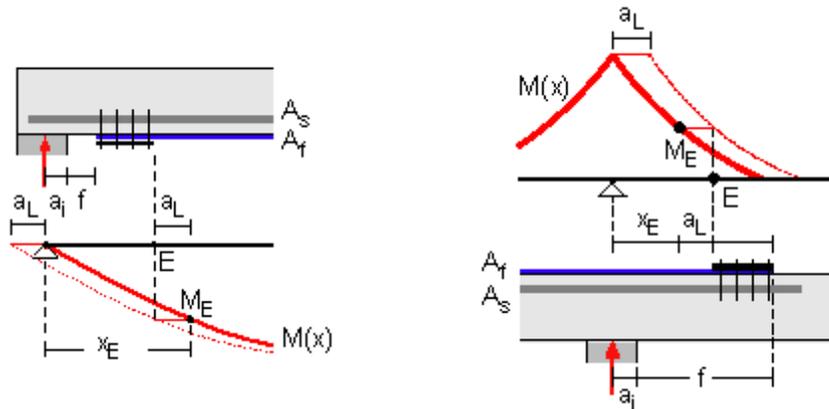
$$F_{ad} = A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{f,a,d} \quad \text{avec} \quad \varepsilon_{f,a,d} = 6,5 \text{ ‰} \quad (15)$$

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 :

$$\text{moment en travée} \quad x_E = a_i + f + l_a + a_L \quad (16)$$

$$\text{moment sur appui} \quad x_E = a_i + f - l_a - a_L \quad (17)$$

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



2.3.6 Éléments en béton précontraint

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.

2.3.7 Règles constructives

Lamelles collées en surface

Distance au bord : $a_{r,min} = c_w$ (18)

Entraxe :
portée $S_{f,max} = 0,2 \cdot l$ (19)

porte-à-faux $S_{f,max} = 0,4 \cdot l$ (20)

dalles $S_{f,max} = 5 \cdot h$ (21)

Nombre de couches :
S&P C-PreStress $n_{f,max} = 1$ (22)

Dans les équations (19) à (32) on a :

- c_w enrobage de béton des étriers internes
- a_r distance entre axe des lamelles et bord libre de l'élément
- S_f entraxe entre les lamelles précontraintes et/ou passives
- n_f Nombre de couche de lamelle

Nota : Il est donné ci-dessus uniquement des règles constructives pour le dimensionnement. Les conditions de pose et les appareils utilisés pour la mise en précontraintes induisent également des contraintes aux niveaux des dimensions minimums à respecter. Ces informations peuvent être obtenues au cas par cas auprès de S&P Reinforcement France.

3 Application

3.1 Support

3.1.1 Qualité du support

Un support sain est indispensable pour réaliser un renforcement avec des Lamelles S&P C-Laminate précontraintes. Avec un ancien béton, le support doit présenter une contrainte d'adhérence de traction d'au moins 1.5 N/mm² et une résistance à la compression d'au moins 25 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.

3.1.2 Injection des fissures

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

3.1.3 Vérification de la qualité et de la planéité du support

3.1.3.1 Détermination de la résistance à la traction du support

La cohésion interne 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.

Tableau 1: résistance minimale à la traction du support β_t

Système de renforcement FRP	Valeurs minimales de résistance à la traction du support β_t
Lamelles S&P C-Laminate	> 1.5 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 β_t établie sur la base de 5 essais au minimum ne doit pas être inférieure à la valeur β_t indiquée dans le tableau 1.

3.1.3.2 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 mm sont admissibles sous une règle de 30 cm. Les surfaces convexes ne sont pas concernées par cet article.

3.1.3.3 Contre flèche et structures concaves

Sur des structures ayant une contre flèche ou étant concave les lamelles pourraient se détacher 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 :

- $0 < f < 1$ cm : appliquer directement de la colle S&P RESIN 220 HP en collage et reprofilage
- $1 \leq f < 4$ cm : appliquer du mortier époxydique de reprofilage S&P RESIN 230 HP puis collage de la lamelle
- $4 \leq f < 7$ 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.

3.1.4 Préparation mécanique 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.

3.2 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 tout autre conditions qui pourraient nuire au collage. Les points ci-dessous doivent être contrôlés avant la pose :

- Point de rosée
- Humidité du support
- Température ambiante

3.2.1 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 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 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.

3.2.2 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 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 maximal 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 %

3.2.3 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

Pour la pose du système S&P C-PreStress il est demandé une température constante durant tous les travaux entre +15°C et +30°C (jour et nuit). Cette température permet de garantir un temps de pose suffisant et le décintrage des lamelles après une nuit de séchage.

3.3 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.

3.3.1 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.

3.3.2 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.

3.3.3 Mélange de la colle à base de 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

3.3.4 *Application de la colle*

La lamelle en fibres de carbone soigneusement nettoyée et complètement sèche est enduite de colle époxy S&P Resin 220 HP à l'aide du tire-colle S&P. La lamelle S&P C-Laminate en fibres de carbone est ensuite appliquée sur le support exempt de poussière.

3.3.5 *Collage des S&P 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. 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 débordée 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 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) à l'aide d'une spatule crantée ou d'une brosse et frais sur frais on procédera à une projection de sable de quartz.

3.3.6 *Mise en place du système de précontrainte S&P*

La description des séquences d'application des lamelles précontrainte (goujons, 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.

3.4 **Contrôle**

3.4.1 *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 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 **non précontrainte**. Cela implique d'avoir collé des lamelles supplémentaires dédiés à ces essais. Il est également possible de prévoir des essais SATTEC pour vérifier à des périodes déterminées la bonne adhérence du système FRP S&P.

3.4.2 *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 chaque mise en œuvre de lamelle précontrainte, il sera appliqué un contrôle d'allongement. Des méthodes de contrôle de l'allongement sont données dans la section « 6.1 Instrumentation de mise en tension » du Plan d'Assurance Qualité.

3.4.3 *Contrôle lors du décintrage*

Les accidentelles pertes de précontraintes lors du décintrage du système seront contrôlées par l'application d'un système de comparaison des déplacements entre le béton et la lamelle près des plaques d'ancrage, de chaque côté de la lamelle. Cette méthode de contrôle est également donnée dans la section « 6.2 Contrôle lors du décintrage » du Plan d'Assurance Qualité.

3.4.4 *Mesure et suivi de la précontrainte de la lamelle dans le temps*

Nous proposons la mise en place d'une jauge SAUGNAC G1.5 ou le suivi du déplacement relatif entre un point de la lamelle et un point du substrat (lorsque la longueur de la lamelle le permet). Ces éléments sont détaillés dans la section « 6.3 Instrumentation définitive » du Plan d'Assurance Qualité.

4 **Protection des éléments de renfort**

4.1 **Revêtements de protection**

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

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

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 pas qu'elles ne soient endommagées après leur pose.

4.2 **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 (acier = 1, béton= 1)

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 60°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 FRP S&P Resin 55 HP ou S&P Resin 220 HP, sablée).

4.3 Protection à la température (en service)

Le procédé de renfort S&P Lamelles S&P C-Laminate précontraintes admet des températures en service de pointe au niveau du collage jusqu'à 52 °C pour la S&P Resin 220 HP.

Le procédé de renfort S&P Lamelles S&P C-Laminate précontraintes sera protégé de l'exposition directe du rayonnement solaire. Comme revêtement de protection en cas d'utilisation de lamelles dans des zones exposées aux intempéries, 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 conforme à la EN 1504-2 ou un revêtement type LHM est conseillé.

5 Sécurité du travail

Pour la sécurité au travail se référer au document « S&P C-PreStress, Plan d'Assurance Qualité » et aux fiches de sécurité des produits.

6 Annexes

Documents de contrôle sur chantiers

Annexe 1	Essais d'adhérence
Annexe 2	Procès-verbal des mesures
Annexe 3	Tableau des points de rosée

Exemple de note de calcul

Annexe 4	Exemple de note de calcul
----------	---------------------------

Annexe 1

Essais d'adhérence suivant EN 1542

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

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

Appareil d'essai d'adhérence:

Eprouvette No.	Effort de tension F [kN]	Résistance d'adhérence f [N/mm ²]	Croquis de rupture 	B:	Béton
				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:

Annexe 3

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.

Annexe 4

Exemple de note de calcul

L'exemple de note de calcul ci-dessous considère une poutre en T, simplement appuyée, d'une portée de 10 m. Les charges permanentes qui se rapportent sur la poutre sont de 35 kN/m. Une augmentation des charges d'exploitation de 17,5 kN/m à 50 kN/m est projetée.

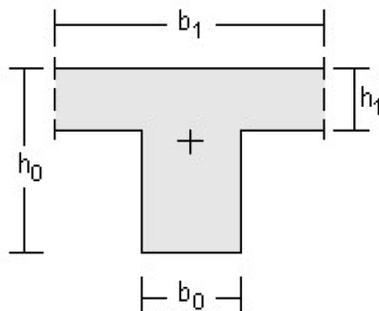
Afin de borner le dimensionnement et la conception du système, les vérifications de la note de calcul sont effectuées pour une valeur de 100% de l'allongement (ϵ_{fp}) et une valeur de 90% de l'allongement (ϵ_{fp}).

Dans cet exemple, $\epsilon_{fp} = 5,5\%$ à 100% de précontrainte.

S&P FRP Lamella

renforcement à la flexion à l'aide de matériaux FRP

Cette note de calcul est valable uniquement si les produits de S&P Reinforcement France sont appliqués.



section

géométrie

poutre en T

$b_0 = 60$	[cm]	$b_1 = 200$	[cm]
$h_0 = 90$	[cm]	$h_1 = 18$	[cm]

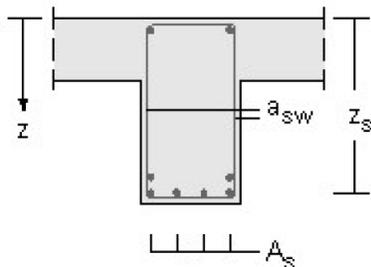
béton

classe:

C 20/25

$f_{ck} = 20$	[N/mm ²]	$\alpha_{cc} = 1$	[-]
$\epsilon_{cu} = 3,5$	[‰]	$E_{cm} = 29962$	[N/mm ²]
$\epsilon_{c2} = 2$	[‰]	$f_{ctm} = 2,21$	[N/mm ²]
		$\alpha_{ct} = 1$	[-]

$\gamma_c = 1,5$ [-]



acier

$\gamma_s = 1,15$ [-]

armature de flexion

armature principale

N°	A _s [cm ²]	z _s [cm]	type d'acier	f _{yk} [N/mm ²]	E _s [N/mm ²]	d _s [mm]
1	4,02	5	Fe E 400	400	200000	16
2	12,32	80,5	Fe E 400	400	200000	28
3	30,79	85	Fe E 400	400	200000	28

sollicitations

état non-renforcé

au moment de l'exécution du renfort
précontrainte (isostatique)

moment en travée

$$M_{Ek0} = 437,5 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{P0} = 0 \quad [\text{kNm}]$$

force de compression

$$N_{Ek0} = 0 \quad [\text{kN}]$$

$$N_P = 0 \quad [\text{kN}]$$

zone tendue déjà fissurée

état renforcé

état limite ultime

moment en travée

$$M_{Edf} = 1528 \quad [\text{kNm}]$$

force de compression

$$N_{Edf} = 0 \quad [\text{kN}]$$

coefficients de sécurité partiels

$$\gamma_{M,m} = 1,44 \quad [-]$$

$$\gamma_{N,m} = 0 \quad [-]$$

état de service

$$M_{Ekf} = 1062,5 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Eqpf} = 812,5 \quad [\text{kNm}]$$

$$N_{Ekf} = 0 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{Eqpf} = 0 \quad [\text{kN}]$$

situation de projet exceptionnelle
(p.ex. cas "feu")

$$M_{Ed,acc} = 875 \quad [\text{kNm}]$$

$$N_{Ed,acc} = 0 \quad [\text{kN}]$$

renfort à la flexion

système FRP

**S&P C-Laminate SM
S&P Resin 220 / 220 HP**

$$E_{fu} = 170000 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$f_{fu} = 2800 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\varepsilon_{fu} = 16 \quad [\%]$$

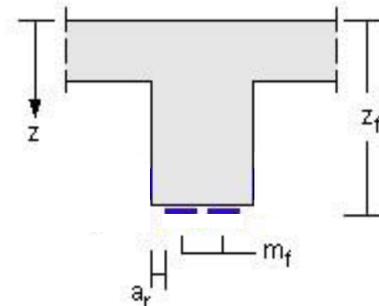
$$\gamma_f = 1,2 \quad [-]$$

$$k_\varepsilon = 0,8 \quad [-]$$

précontraint

$$\varepsilon_{f,limit} = 10 \quad [\%]$$

$$\Delta\varepsilon_{f,limit} = 6 \quad [\%]$$



Calcul avec 100% de précontrainte :

section FRP

N°	section [mm/mm]	n_f [pce]	m_f [pce]	s_f [cm]	A_f [cm ²]	Z_f [cm]	ϵ_{fp} [‰]
1	100 / 1.4	1	2	45	2,8	90	5,5

précontrainte FRP (isostatique)

$$N_{fp} = 261,8 \quad [\text{kN}]$$

$$M_{fp0} = -147,8 \quad [\text{kNm}]$$

état non-renforcé

résistance de la section non-renforcée:

$$M_{Rd0} = 1210,6 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Re0} = 1395,4 \quad [\text{kNm}]$$

état renforcé

degré de renforcement: $\eta_M = 1,26 \quad [-]$

sécurité en cas de perte
du renforcement FRP:
(p.ex. cas "feu") $\gamma_{M,acc} = 1,59 \quad [-]$

dimensionnement

$$A_{f,min} = 2,49 \quad [\text{cm}^2]$$

$$A_{f,eff} = 2,8 \quad [\text{cm}^2]$$

$$M_{Edf} = 1528 \quad [\text{kNm}]$$

$$M_{Rdf} = 1571 \quad [\text{kNm}]$$

vérification

$$M_{Rdf} > M_{Edf}$$



déformations initiales



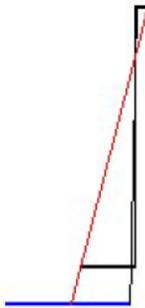
$$\epsilon_c = -0,125 \quad [‰]$$

$$x = 22,8 \quad [\text{cm}]$$

$$\epsilon_s = 0,342 \quad [‰]$$

$$\epsilon_f = 5,5 \quad [‰]$$

déformations - état limite ultime ($A_{f,min}$)



$$\epsilon_c = -1,057 \quad [‰]$$

$$x = 16,1 \quad [\text{cm}]$$

$$\epsilon_s = 4,54 \quad [‰]$$

$$\epsilon_f = 10 \quad [‰]$$

déformations - état limite de service

($A_{f,eff}$)



$$\epsilon_c = -0,366 \quad [‰]$$

$$x = 19,4 \quad [\text{cm}]$$

$$\epsilon_s = 1,234 \quad [‰]$$

$$\epsilon_f = 6,459 \quad [‰]$$

$$\epsilon_{sy} = 2 \quad [‰]$$



contraintes

combinaison caractéristique

combinaison quasi-permanente

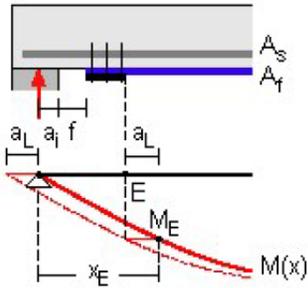
	σ_{max} [N/mm ²]	σ_{limite} [N/mm ²]	
béton	-6,64	-12	= 0,6 f_{ck}
acier d'armature	246,76	320	= 0,8 f_{yk}
matériau FRP	1098		

	σ_{max} [N/mm ²]	σ_{limite} [N/mm ²]	
béton	-5	-9	= 0,45 f_{ck}
acier d'armature	175,24		

Utilisez la contrainte de l'armature pour justifier la maîtrise de la fissuration



ancrage d'extrémité FRP



bout de précontrainte

f = 40 [cm]
a_i = 8 [cm]
a_l = 39,9 [cm]

système de précontrainte S&P

γ_a = 1,3 [-]

efforts internes au point E

x_E = 115,1 [cm]
M_{Edf,E} = 622,6 [kNm]
N_{Edf,E} = 0 [kN]

armature interne au point E

N°	A _s [cm ²]	z _s [cm]
1	4,02	5
2	12,32	80,5
3	30,79	85

résistance d'ancrage

N°	F _{fd,E} [kN]	F _{ad} [kN]
1	292,53	309,4

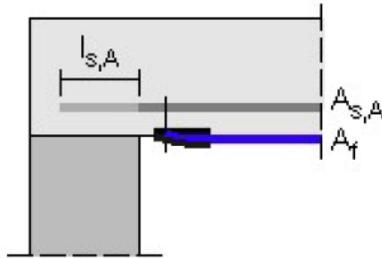
vérification

F_{fd,E} < F_{ad}

vérification de l'ancrage ok



ancrage de l'armature de flexion à l'appui



appui direct

efforts internes à l'appui

$$V_{Edf,A} = 611 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{Edf,A} = 0 \quad [\text{kN}]$$

armature à l'appui

N°	A_s [cm ²]	z_s [cm]	d_s [mm]	$l_{s,A}$ [cm]	$\alpha_{1..5}$ [-]	type
1	4,02	5	16	15	1	nervuré
2	12,32	80,5	28	15	1	nervuré
3	30,79	85	28	40	1	nervuré

forces d'ancrage

force requise	$F_{A,min} = 305,97$	[kN]		
armature interne	$F_{s,A} = 469,63$	[kN]		
renforcement FRP	$F_{f,A,min} = 0$	[kN]	$A_{f,A,min} = 0$	[cm ²]
	$F_{f,A,eff} = 0$	[kN]		

vérification

$$F_{f,A,eff} > F_{f,A,min} \quad \checkmark$$

ancrage à l'appui suffisant

Calcul avec 90% de précontrainte :

section FRP

N°	section [mm/mm]	n_f [pce]	m_f [pce]	s_f [cm]	A_f [cm ²]	z_f [cm]	ε_{fp} [‰]
1	100 / 1.4	1	2	45	2,8	90	4,95

précontrainte FRP (isostatique)

$$N_{fp} = 235,62 \text{ [kN]} \quad M_{fp0} = -133 \text{ [kNm]}$$

état non-renforcé

résistance de la section non-renforcée:

$$M_{Rd0} = 1210,6 \text{ [kNm]} \\ M_{Re0} = 1395,4 \text{ [kNm]}$$

état renforcé

degré de renforcement: $\eta_M = 1,26 \text{ [-]}$

sécurité en cas de perte
du renforcement FRP:
(p.ex. cas "feu") $\gamma_{M,acc} = 1,59 \text{ [-]}$

dimensionnement

$$A_{f,min} = 2,46 \text{ [cm}^2\text{]} \quad M_{Edf} = 1528 \text{ [kNm]} \\ A_{f,eff} = 2,8 \text{ [cm}^2\text{]} \quad M_{Rdf} = 1575,6 \text{ [kNm]}$$

vérification

$$M_{Rdf} > M_{Edf} \quad \checkmark$$

déformations initiales



$$\begin{aligned} \epsilon_c &= -0,13 \quad [\text{‰}] \\ x &= 21,9 \quad [\text{cm}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= 0,373 \quad [\text{‰}] \\ \epsilon_f &= 4,95 \quad [\text{‰}] \end{aligned}$$

déformations - état limite ultime ($A_{f,min}$)



$$\begin{aligned} \epsilon_c &= -1,118 \quad [\text{‰}] \\ x &= 15,3 \quad [\text{cm}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= 5,088 \quad [\text{‰}] \\ \epsilon_f &= 10 \quad [\text{‰}] \end{aligned}$$

déformations - état limite de service

($A_{f,eff}$)



$$\begin{aligned} \epsilon_c &= -0,37 \quad [\text{‰}] \\ x &= 19,2 \quad [\text{cm}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= 1,266 \quad [\text{‰}] \\ \epsilon_f &= 5,909 \quad [\text{‰}] \end{aligned}$$

$$\epsilon_{sy} = 2 \quad [\text{‰}] \quad \checkmark$$

contraintes

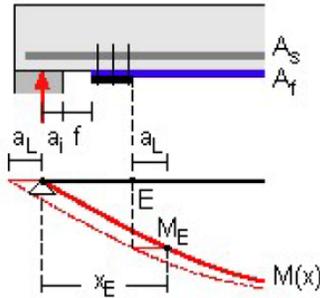
combinaison caractéristique

combinaison quasi-permanente

	σ_{max} [N/mm ²]	σ_{limite} [N/mm ²]		σ_{max} [N/mm ²]	σ_{limite} [N/mm ²]	
béton	-6,71	-12	= 0,6 f_{ck}	-5,08	-9	= 0,45 f_{ck}
acier d'armature	253,2	320	= 0,8 f_{yk}	181,67		
matériau FRP	1004,55					

Utilisez la contrainte de l'armature pour justifier la maîtrise de la fissuration ✓

ancrage d'extrémité FRP



bout de précontrainte

f	=	40	[cm]
a_i	=	8	[cm]
a_l	=	39,9	[cm]

système de précontrainte S&P

γ_a	=	1,3	[-]
------------	---	-----	-----

efforts internes au point E

x_E	=	115,1	[cm]
$M_{Edf,E}$	=	622,6	[kNm]
$N_{Edf,E}$	=	0	[kN]

armature interne au point E

N°	A_s [cm ²]	z_s [cm]
1	4,02	5
2	12,32	80,5
3	30,79	85

résistance d'ancrage

N°	$F_{fd,E}$ [kN]	F_{ad} [kN]
1	267,88	309,4

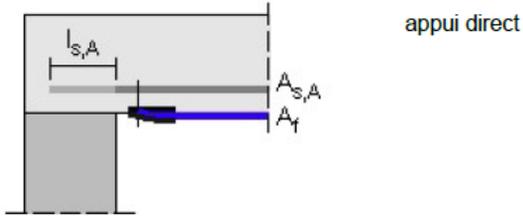
vérification

$F_{fd,E} < F_{ad}$



vérification de l'ancrage ok

ancrage de l'armature de flexion à l'appui



efforts internes à l'appui

$$V_{Edf,A} = 611 \quad [\text{kN}]$$

$$N_{Edf,A} = 0 \quad [\text{kN}]$$

armature à l'appui

N°	A_s [cm ²]	z_s [cm]	d_s [mm]	$l_{s,A}$ [cm]	$\alpha_{1,5}$ [-]	type
1	4,02	5	16	15	1	nervuré
2	12,32	80,5	28	15	1	nervuré
3	30,79	85	28	40	1	nervuré

forces d'ancrage

force requise	$F_{A,min} = 305,07$	[kN]		
armature interne	$F_{s,A} = 469,63$	[kN]		
renforcement FRP	$F_{f,A,min} = 0$	[kN]	$A_{f,A,min} = 0$	[cm ²]
	$F_{f,A,eff} = 0$	[kN]		

vérification

$F_{f,A,eff} > F_{f,A,min}$ ✓

ancrage à l'appui suffisant