

Avis Technique 3.3/19-989_V2

Annule et remplace l'Avis Technique 3.3/19-989_V1

*Renforcement d'éléments
de structure par collage de
tissus verre et/ou carbone
avec une matrice polymère*

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

SYSTÈME S&P C-Sheet

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

Groupe Spécialisé n° 3.3

Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure

Publié le



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

(arrêté du 21 mars 2012)

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

Les Avis Techniques sont publiés par le Secrétariat des Avis Techniques, assuré par le CSTB. Les versions authentifiées sont disponibles gratuitement sur le site internet du CSTB (<http://www.cstb.fr>)
© CSTB 2019

Le Groupe Spécialisé n°3.3 « Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure » de la Commission Chargée de formuler les Avis Techniques a examiné le 11 04 2019, le procédé de renforcement par collage de tissus verres et/ou carbone avec une matrice polymère SYSTÈME S&P C-Sheet, présenté par la société S&P Reinforcement France. Il a formulé sur ce procédé l'Avis Technique ci-après. Cet Avis annule et remplace l'Avis Technique 3.3/19-989_V1. Cet Avis a été formulé pour les utilisations en France Métropolitaine.

1. Définition succincte

1.1 Description succincte

Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller sur la surface des éléments visés un tissu de fibres de carbone à l'aide d'une résine époxydique synthétique à deux ou trois composants.

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

1.2 Identification

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

- Tissus S&P C-Sheet 240 et S&P C-Sheet 640 : présentation en rouleaux. La dénomination et le numéro de lot sont indiqués sur tous les rouleaux. Les tissus sont livrés prédécoupés en usine sur mesure ou en rouleaux de 100 mètres (S&P C-SHEET 240) et 50 mètres (S&P C-SHEET 640).
- S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP, colles pour tissus S&P C-Sheet : Colles époxydiques bi-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en pots métalliques de 6 kg, 13 kg ou autres conditionnements sur demande.
- S&P Resicem ou S&P Resicem HP, colles pour tissus S&P C-Sheet 240 : Colles époxy/ciment perméables à la vapeur d'eau pour le collage des tissus en cas d'emballage complet d'éléments en béton. Ce système améliore les échanges gazeux entre l'élément enrobé et l'extérieur.
- S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP, colles époxy utilisées pour le reprofilage de faible épaisseur : Colles époxydiques bi-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en kits de 5kg, 15kg ou autres conditionnements sur demande.
- S&P RESIN 230 ou S&P Resin 230 HP : Mortiers époxy tri-composants utilisés pour reprofiler le support avant application des tissus S&P C-Sheet.

2. AVIS

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

Cet Avis ne vaut que si :

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

2.1 Domaine d'emploi accepté

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

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

- En béton armé ;
- En béton précontraint.

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

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

L'utilisation en bâtiments industriels est admise tant que l'agressivité chimique ambiante peut être considérée comme normale et que les

charges non statiques ne sont pas de nature répétitive entretenue pouvant donner lieu à fatigue. On peut citer, à titre d'exemple de charges exclues, les machines tournantes et les passages intensifs et répétés de camions.

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

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

Le renforcement structurel de radiers n'est pas visé car les risques d'endommagement des fibres du tissu sont trop importants.

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

L'Avis n'est valable que si la température de la résine et du support au niveau du collage n'excède pas :

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

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

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

2.2 Appréciation sur le procédé

2.2.1 Aptitude à l'emploi

2.2.1.1 Stabilité

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

2.2.1.2 Sécurité en cas d'incendie

2.2.1.2.1 Réaction au feu

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

2.2.1.2.2 Résistance au feu

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

2.2.1.3 Prévention des accidents lors de la mise en œuvre

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

Données environnementales

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

Aspects sanitaires

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

2.22 Durabilité - Entretien

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

- Atmosphère agressive (type solvant) ;
- Lorsque la température est susceptible de dépasser la valeur en pointe indiquée dans le dossier technique établi par le demandeur (valeur de pointe : valeur dont la durée de maintien est inférieure à 24 heures) de la résine utilisée.

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

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

2.23 Fabrication et contrôle

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

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

L'Avis Technique du procédé C-SHEET 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.

2.24 Finitions

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

Dans le cas d'une utilisation du procédé de renforcement en face supérieure des dalles, le système de renforcement doit être protégé par un mortier.

2.3 Prescriptions techniques

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

2.31 Conditions de conception et de calcul

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

2.311 Justification à la rupture

Cette justification est à effectuer dans tous les cas hors situation d'incendie. Elle doit être réalisée en prenant en compte la hauteur totale de la section de l'élément à renforcer (ex : pour une poutre en T, il convient de considérer la hauteur totale de la section avec la table de compression). Elle consiste en une vérification de l'élément à la rupture, toutes redistributions effectuées, et sans tenir compte du renforcement, sous la combinaison ELS rare (considérée conventionnellement dans les calculs comme combinaison ELU fondamentale) $G + Q1 + \Sigma \gamma_{oi} Qi$, où G représente la sollicitation due à la charge permanente et $\Sigma \gamma_{oi} Qi$ celle due aux charges de courte durée d'application dites d'accompagnement de l'action de base $Q1$, y compris s'il y a lieu les charges climatiques et celles dues aux instabilités.

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

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

2.312 Renforcement vis-à-vis du moment de flexion

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.313 Renforcement vis-à-vis de l'effort tranchant

Le renforcement des dalles vis-à-vis de l'effort tranchant n'est pas visé dans le cadre du présent Avis Technique.

Les poutres soumises à un effort tranchant sont justifiées vis-à-vis de l'état limite ultime et de l'état limite de service, suivant le chapitre 2.6 des règles AFGC (février 2011). Le renforcement n'est pas admis dans le cas d'un moment négatif sur l'appui considéré sauf si la poutre est complètement ceinturée comme décrit au paragraphe §4.83 du Dossier Technique établi par le demandeur.

Dans le cas des poutres sans table de compression les bandes de composite entourent la poutre.

Dans tous les cas, les vérifications vis-à-vis de l'effort tranchant doivent être effectuées conformément au paragraphe §4.8 du Dossier Technique établi par le demandeur.

Pour le cas des poutres sous une dalle, si l'ancrage total de l'effort tranchant dans la hauteur comprimée de la poutre est réalisé par des dispositions d'ancrage. Dans ce cas, il y a lieu de tenir compte des capacités résistantes du système d'ancrage, la poutre ainsi renforcée pouvant être justifiée sur la totalité de sa section (hauteur de table comprise).

2.314 Renforcement des éléments en béton précontraint

Le dimensionnement du renforcement des éléments en béton précontraint doit être effectué conformément au paragraphe §4.7 du Dossier Technique établi par le demandeur. Les principes de justifications sont identiques à ceux développés dans le cas du béton armé sauf en ce qui concerne les états limites de service en flexion :

- Pour la justification à l'état limite de service, il y a lieu de limiter la contrainte de traction à $0,8 f_{pk}$ dans les armatures de précontrainte (cas de la précontrainte adhérente) sous combinaison caractéristique.
- Dans tous les cas, il convient de s'assurer que, pour le renforcement en flexion des éléments en béton précontraint, la section d'enrobage soit complètement comprimée sous les combinaisons quasi permanentes.

2.315 Renforcement de poteaux en béton armé par confinement

Le renforcement par le procédé S&P C-Sheet peut être utilisé pour augmenter la capacité portante des poteaux sollicités en compression. Le dimensionnement du renforcement est effectué conformément aux dispositions décrites au paragraphe §5 du Dossier technique établi par le demandeur (principe de justification des recommandations de l'AFGC de 2011).

2.32 Conditions de mise en œuvre

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

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

Conclusions

Appréciation globale

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

Validité

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

*Pour le Groupe Spécialisé n°3.3
Le Président*

3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

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

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

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

*Le Rapporteur du Groupe Spécialisé
n° 3.3*

Dossier Technique

établi par le demandeur

A. Description

1. Principe

Le procédé S&P C-Sheet est un système de renfort structural d'éléments en béton armé et béton précontraint. Les tissus S&P C-Sheet sont composés de fibres de carbone unidirectionnelles fixées sur une trame en polyester en différents grammages et différentes largeurs permettent un renfort à la flexion, à la compression et au cisaillement.

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

Les deux logiciels d'aide au calcul FRP Lamella et FRP Colonna font partie intégrante du système S&P C-Sheet, et sont des outils adaptés pour les bureaux d'études chargés du dimensionnement.

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

2. Domaines d'emploi

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

- Les tissus S&P C-SHEET 640, de par leur module d'élasticité élevé, sont utilisés pour l'augmentation de résistance à l'effort de cisaillement des poutres.
- Les tissus S&P C-SHEET 240, collés sur la partie tendue, sont utilisés pour le renfort de poutres ou planchers à la flexion. Ils permettent également, par confinement de renforcer des éléments comprimés tels que les poteaux vis-à-vis des efforts de compression. Ils sont également utilisés pour le renfort au cisaillement des poutres.

Exemples d'application :

- Renforcement de poutres et planchers de bâtiments d'habitations ;
- Renforcement de poteaux ;
- Renfort de trémies ;
- Renfort de silos et réservoirs.

Les domaines d'emplois principaux sont :

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

2.1 Types de charges

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

2.2 Zones géographiques d'utilisation

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

2.3 Durabilité

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

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

3. Description des matériaux

3.1 Tissus S&P C-Sheet

Les tissus S&P C-Sheet 240 et 640 ont des modules d'élasticité différents pour répondre au mieux aux différents domaines d'emploi.

Identification et marquage

Exemple de désignation : S&P C-Sheet 240, 200g
C-Sheet 240 Référence du type de tissu
200g Grammage [g/m²]

Un numéro de lot et la désignation sont apposés sur chaque rouleau.

Contrôles :

Chaque lot de fibre livré fait l'objet d'essais de contrôle interne, portant sur : le module d'élasticité, l'allongement à rupture, la densité et le diamètre du fil de carbone.

Les tissus S&P C-Sheet sont unidirectionnels et non tissés, l'embuvage des tissus est donc quasi nul (embuvage = déviation des fibres par tissage).

Caractéristiques techniques des tissus S&P C-Sheet 240 (unidirectionnel)	200 g/m ²	300 g/m ²	400 g/m ²	600 g/m ² (fabrication spéciale)
Poids des fibres [g/m ²] (sens principal)	200	300	400	600
Poids au m ² Sheet [g/m ²]	230	330	430	630
Masse volumique [g/cm ³]	1.77	1.8	1.8	1.8
Allongement à la rupture [%]	1.55	1.55	1.55	1.55
Épaisseur de dimensionnement (poids des fibres/densité) [mm]	0.113	0.167	0.222	0.333
Section théorique de dimensionnement, largeur de 1000 mm [mm ²]	113	167	222	333
Livraison en rouleaux :	Largeur : 300 ou 600 mm Fabrication spéciale largeur 200mm			

Caractéristiques techniques des tissus S&P C-Sheet 640 (unidirectionnel)	400 g/m ²
Poids des fibres [g/m ²] (sens principal)	400
Poids au m ² du S&P C-SHEET [g/m ²]	430
Masse volumique [g/cm ³]	2.12
Épaisseur de dimensionnement (poids des fibres/densité) [mm]	0.189
Section théorique de dimensionnement, largeur de 1000 mm [mm ²]	189
Livraison en rouleaux : (Rouleaux spéciaux sur demande)	Largeur : 300 mm

Le dimensionnement des tissus S&P C-Sheet est mené exclusivement en tissu sec pour éviter les erreurs liées aux aléas de consommation de résine.

Les tissus peuvent être superposés jusqu'à 5 couches. De même, les tissus peuvent être pliés dans le sens longitudinal jusqu'à obtenir 5

couches. Ceci est possible car les tissus sont unidirectionnels. Dans ce cas l'application doit être réalisée en voie humide (voir chapitre 7).

Exemple : Un tissu de 300mm de large peut être plié en 2 dans le sens de la longueur, cela donne 2 couches de 150mm de large. Si on plie ce même tissu encore en 2 on obtient 4 couches de 75mm de large.

S&P produisant ses tissus dans sa propre usine, ils peuvent être obtenus, sur demande, dans des grammages différents de ceux donnés dans les tableaux ci-dessus et en différentes largeurs. Exemples : 550g/m² ou 475g/m²

3.2 S&P Resin 55 et S&P Resin 55 HP colles pour tissus S&P C-Sheet

Colle époxy bi-composant pour le collage et le marouflage des tissus S&P C-Sheet sur le support ;

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

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

3.3 S&P Resicem et S&P Resicem HP colles pour tissus S&P C-Sheet

Colles époxy/ciment pour le collage des tissus S&P C-Sheet; en cas d'emballage complet d'un élément en béton ou de pose sur support avec une humidité > 4%. Ce système améliore les échanges gazeux entre l'élément enrobé et l'extérieur.

Caractéristique	S&P Resicem	S&P Resicem HP
Masse volumique	~ 1,36 kg/l	~ 1,30 kg/l
Délai de durcissement total	~ 7 jours	
Epaisseur d'application	voir consommations ci-après	
Température d'application	+8 °C à +35 °C	
Résistance à la traction sur béton	> 2,5 N/mm ² (rupture dans le béton)	> 3,0 N/mm ² (rupture dans le béton)
Humidité du support à l'application	< 10 %	
Résistance à la traction sur acier	≥ 12 MPa	≥ 14 MPa
DPU	~ 50 min.	~ 45 min.

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

Consommation selon la rugosité du support de béton (valeurs usuelles). Les consommations peuvent être inférieures pour une pré-imprégnation mécanisée.

Tissu	Consommation de S&P Resin 55 S&P Resin 55 HP (Imprégnation)	Consommation de S&P Resicem S&P Resicem HP (Imprégnation)
S&P C-Sheet S&P 240 (200 g/m ²)	~ 600 – 800 g/m ²	~ 1100 – 1500 g/m ²
S&P C-Sheet S&P 240 (300 g/m ²)	~ 700 – 1000 g/m ²	~ 1300 – 1600 g/m ²
S&P C-Sheet S&P 240 (400 g/m ²) S&P C-Sheet S&P 640 (400 g/m ²)	~ 900 – 1300 g/m ²	~ 1400 – 1800 g/m ²

S&P C-Sheet S&P 240 (600 g/m ²)	~ 1100 – 1500 g/m ²	~ 1500 – 1900 g/m ²
---	--------------------------------	--------------------------------

3.4 S&P Resin 220 et S&P Resin 220 HP - Colles pour reprofilage de faible épaisseur

Colles époxy bi-composant pour reprofilage jusqu'à 5mm d'épaisseur avant application des tissus.

Caractéristique	S&P Resin 220	S&P Resin 220 HP
Masse volumique	~ 1,75 kg/l	~ 1,60 kg/l
Délai de durcissement total	~ 3 jours	~ 7 jours
Epaisseur d'application	jusqu'à 5 mm	
Température d'application	+8 °C à +35 °C	
Résistance à la traction sur béton	> 3,0 N/mm ² (rupture dans le béton)	
Humidité du support à l'application	< 4 %	
Résistance à la traction sur acier	≥ 14 MPa	≥ 15 MPa
DPU	~ 60 min.	~ 90 min.

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

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

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

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

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

3.6 Pièces métalliques et ancrages pour renforcement à l'effort tranchant

Les cornières métalliques peuvent être :

- En acier S235 ou d'une nuance supérieure en fonction des efforts à reprendre. Dans ce cas, elles doivent être protégées de la corrosion. S&P fournira des pièces protégées par un complexe anticorrosion résistant aux sollicitations et compatible avec ses résines.
- En acier inoxydable. La qualité de l'acier inoxydable sera définie en fonction des sollicitations. Les surfaces seront préparées de manière adéquate pour le collage.

Les ancrages et tiges filetées seront en acier électrozingué ou inoxydables. Par exemple : Ancrage pour béton S&P TRD ou S&P TRD-A4 avec résines de scellement S&P ResAC-16 ou S&P ResEP-16.

La nuance et la protection anti-corrosion seront à adapter en fonction de chaque chantier et cela afin de répondre aux questions de durabilités et atmosphériques (classes de corrosivité de l'atmosphère conformes à NF EN ISO 9223).

La nuance d'acier sera à minima de type S235.

La protection anticorrosion, peut-être de type :

- Protection par peinture anticorrosion : HYDROSOB de la société SOB Peinture ou équivalent ;
- Électro zingage, galvanisation : Galvanisation à 60 micromètres d'épaisseur, conformément aux prescriptions de la norme NF EN ISO 1461, par exemple ;
- Galvanisation et peinture ;
- Acier inoxydable de type A2 ou A4 : Acier inoxydable de classe 3041 (A2) ou 316L (A4), ou équivalent.

Dans tous les cas, il sera respecté les assemblages de système anticorrosion afin de ne pas créer de couple galvanique.

4. Dimensionnement

4.1 Introduction

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

Le présent avis technique est réalisé conformément aux Eurocodes et aux règles AFGC 2011 car ce sont les normes actuelles. Toutefois nous offrons la possibilité de dimensionner selon les BAEL et BPEL 91 révisés 99 en se conformant à l'annexe 5 du présent avis technique.

4.2 Comportement du renfort FRP

4.2.1 Notations

Matériau FRP

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

Renfort à la flexion

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

γ_{Me} Sécurité globale restante lors de la défaillance du renfort FRP

Ancrage

f_{csm}	Résistance à la traction superficielle du béton (moyenne)
$f_{ck,cube}$	Résistance à la compression du béton sur cube (valeur caractéristique)
γ_c	Coefficient de sécurité du béton
$F_{rd,E}$	Force de traction du renfort FRP au point E
l_b	Longueur d'ancrage du renfort FRP
F_{bd}	Valeur de dimensionnement de la force de rupture de l'adhérence
$F_{bd,max}$	Valeur de dimensionnement de la force maximale de rupture de l'adhérence
$l_{b,max}$	Longueur d'ancrage correspondant à la force maximale de rupture de l'adhérence
$\tau_{K,k}$	Valeur caractéristique de la résistance au cisaillement de la colle époxy
γ_b	Coefficient de sécurité de la colle époxy
x_E	Distance entre le point E et l'axe théorique de l'appui
a_i	Distance entre l'axe théorique de l'appui et l'arête du bord de l'appui
f	Distance entre l'extrémité du renfort FRP et l'arête du bord de l'appui
a_L	Décalage horizontal de la ligne de force de traction selon Eurocode 2

Effort tranchant

V_{Edf}	Valeur de dimensionnement de l'effort tranchant à l'état renforcé
V_{max}	Capacité maximale à l'effort tranchant de la section renforcée
$V_{Rd,c}$	Résistance au cisaillement du béton
$V_{Rd,s}$	Résistance au cisaillement de l'acier existant
$V_{Rd,max}$	Résistance maximum des bielles de compression
ΔV	Effort tranchant admissible par le renfort de l'effort tranchant
a_{sw}	Section de l'armature d'étriers internes
σ_{sw}	Contrainte des étriers intérieurs
$\epsilon_{fw,ELU}$	Allongement de dimensionnement à l'ELU pour le renfort à l'effort tranchant
t_w	Épaisseur des étriers externes
b_w	Largeur des étriers externes
s_w	Entraxe des étriers externes
a_w	Section de l'armature d'étriers externes par mètre
A_w	Section d'un seul étrier externe
σ_{fw}	Contrainte des étriers externes
$\sigma_{fw,ELU}$	Contrainte de dimensionnement à l'ELU pour le renfort à l'effort tranchant
z_f	Bras de levier interne entre la force de compression du béton et la force de tension du renfort flexionnel FRP

Confinement

A_g	section transversale totale du poteau
A_s	section transversale de l'armature longitudinale
f_{c0}	valeur caractéristique de la résistance du béton à la compression
f_{cc}	valeur caractéristique de la résistance à la compression du béton confiné
α	coefficient pour le chargement à long terme selon EC2
f_s	valeur caractéristique de la résistance de l'acier
γ_{cc}	coefficient de sécurité partiel pour la résistance tri-axial du béton
γ_s	coefficient de sécurité partiel pour la résistance de l'acier
D	diamètre de la section du poteau circulaire
b	grand côté de la section du poteau rectangulaire
d	petit côté de la section du poteau rectangulaire
r	rayon de courbure des angles du poteaux rectangulaire
ρ_f	ratio d'armature FRP
ϵ_a	déformation axiale du poteau
ϵ_l	déformation latérale
σ_l	compression effectif du confinement

4.3 Lois de comportement et caractéristiques du matériau C-Sheet

4.3.1 Caractéristiques des tissus S&P C-Sheet à la flexion

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

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

Tissus S&P C-Sheet 240 en flexion			S&P C-Sheet 240
Allongement à la rupture (valeur moyenne)	ϵ_{fu}	[‰]	15,5
Module d'élasticité (valeur de calcul)	E_{fu}	[MPa]	240 000
Contrainte de rupture (valeur moyenne)	f_{fu}	[MPa]	3 720
Contrainte de dimensionnement à l'ELS	$\sigma_{f,ELS}$	[MPa]	1 200
Contrainte de dimensionnement à l'ELU	$\sigma_{f,ELU}$	[MPa]	1 720
Allongement de dimensionnement à l'ELS	$\epsilon_{f,ELS}$	[‰]	5,00
Allongement de dimensionnement à l'ELU	$\epsilon_{f,ELU}$	[‰]	7,17

Exemple de dimensionnement pour un tissu C-Sheet 240, 400g/m²

Dimensionnement à l'ELS : $R_{fd,ELS} = 1'200 \text{ MPa} \times 234\text{mm}^2 = 280.8 \text{ kN}$

Dimensionnement à l'ELU : $R_{fd,ELU} = 1'720 \text{ MPa} \times 234\text{mm}^2 = 402.5 \text{ kN}$

4.3.2 Caractéristiques des tissus S&P C-Sheet à l'effort tranchant

Tissus S&P C-Sheet 240 et 640 à l'effort tranchant			S&P C-Sheet 240	S&P C-Sheet 640
Allongement à la rupture (valeur moyenne)	ϵ_{fu}	[‰]	15,5	4,0
Module d'élasticité (valeur de calcul)	E_{fu}	[MPa]	240 000	640 000
Contrainte de rupture (valeur moyenne)	f_{fu}	[MPa]	3 720	2 560
Contrainte de dimensionnement à l'ELU Pour l'utilisation avec ancrages par cornières métallique, limiter la contrainte de dimensionnement $\sigma_{fw,ELU}$ à 800 MPa	$\sigma_{fw,ELU}$	[MPa]	960	1 190
Allongement de dimensionnement à l'ELU (Limitation interne S&P)	$\epsilon_{fw,ELU}$	[‰]	4,00	1,86
Allongement de dimensionnement à l'ELU selon AFGC 2011	$\epsilon_{fw,ELU}$	[‰]	7,17	1,86

Exemple de dimensionnement pour un tissu C-SHEET 240, 400g/m²

Dimensionnement à l'ELU : $R_{fdw,ELU} = 960 \text{ MPa} \times 234\text{mm}^2 = 224.6 \text{ kN}$

4.4 Adhérence C-Sheet – support pour les systèmes C-Sheet collés en surface

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

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

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

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

Minimum pour les tissus : 1.50 N/mm²

Maximum pour tissus : 3.00 N/mm²

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

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

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

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

4.5 Hypothèses de calcul

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

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

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

$$E_{df} \leq R_{df} \quad (5)$$

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

4.6 Reprise des efforts de déviation

Lorsque la mise en œuvre du système S&P C-Sheet induit une poussée au vide, la zone de déviation doit être munie d'un dispositif reprenant ces efforts. Le système pour reprendre la poussée au vide peut être composé d'une pièce métallique ancrée dans le béton par des ancrages chimiques type S&P ResAC-16 ou S&P ResEP-16. Les ancrages et la pièce métallique seront dimensionnés en fonction des efforts de déviation à reprendre. Un rayon de courbure minimum de 25mm pour les tissus devra être respecté :

Rayon $\geq 25\text{mm}$

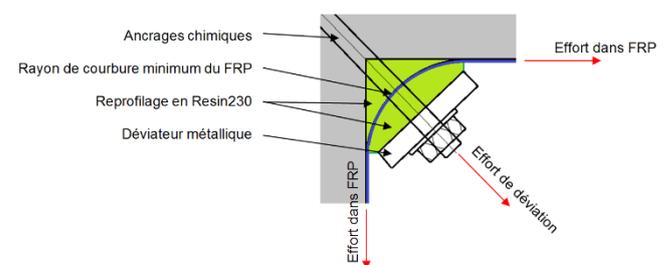
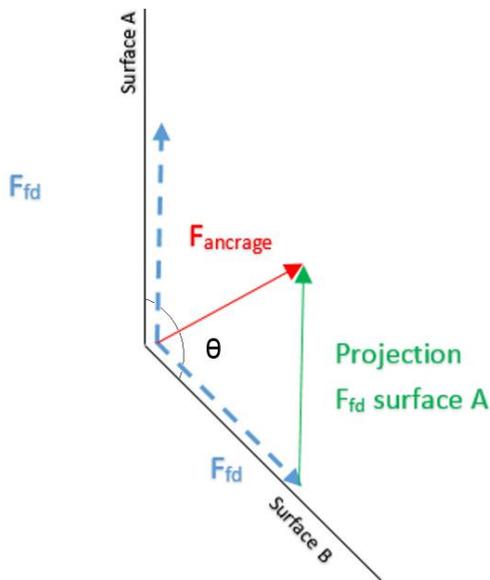


Schéma de résolution géométrique pour les efforts de poussée au vide

Les efforts sont déterminés conformément à la résolution graphique proposée, à la suite les ancrages sont dimensionnés conformément aux ETE par exemple pour une solution d'ancrage en scellement en prenant les règles de dimensionnement correspondantes à chaque élément.

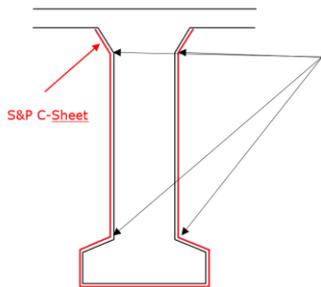


On a alors :

$$R_{\text{ancrage}} \leq F_{\text{ancrage}} = \sqrt{(F_{fd}(1 - \sin(\theta - 90))^2 + (F_{fd}(\cos(\theta - 90))^2}$$

Avec :

- θ , l'angle entre la surface A et la surface B en degré. θ est compris entre 0 et 180° ;
- R_{ancrage} , la résistance à la traction de l'ancrage conformément à l'ETE [N] ;
- F_{ancrage} , l'effort à reprendre par l'ancrage [N] ;
- F_{fd} , l'effort dans le S&P C-Sheet [N].



Positions des anti-déviateurs sur une poutre I.
Nota : tous les angles seront adoucis par ponçage et/ou congé en mortier S&P RESIN 220 ou S&P RESIN 220 HP ou S&P RESIN 230 ou S&P RESIN 230 HP, afin de respecter les règles constructives du DTED.

4.7 Renforcement en flexion du béton armé et précontraint

4.7.1 Principe

La détermination de la capacité portante flexionnelle de la section non renforcée MRd0 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 MRdf 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 $F_s = E_s \cdot A_s \cdot \epsilon_s \leq A_s \cdot f_{yk} / \gamma_s$ (6)

FRP $F_f = E_{fk} \cdot A_f \cdot \epsilon_f$ avec $\epsilon_f \leq \epsilon_{f,ELU}; \epsilon_{f,ELS}$ (7)

Béton $F_c = b \cdot \alpha_R \cdot x \cdot \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$ (8)

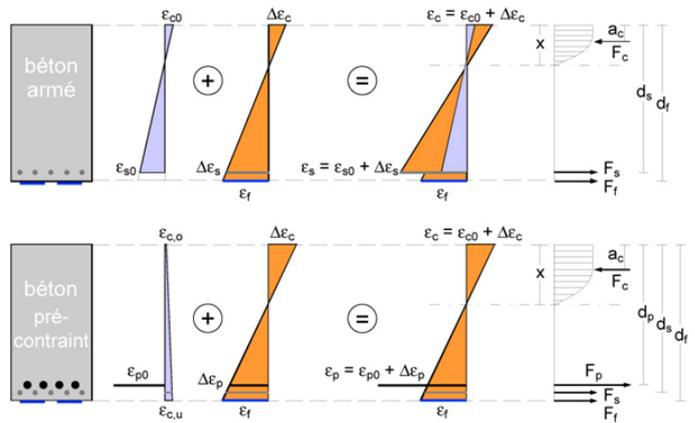
(α_R : paramètre de la courbe parab.)

Conditions d'équilibre

$\Sigma H = 0 \quad F_c - F_s - F_p - F_f = 0$ (9)

$\Sigma M = 0 \quad F_c \cdot a_c - F_s \cdot d_s - F_p \cdot d_p - F_f \cdot d_f = 0$ (10)

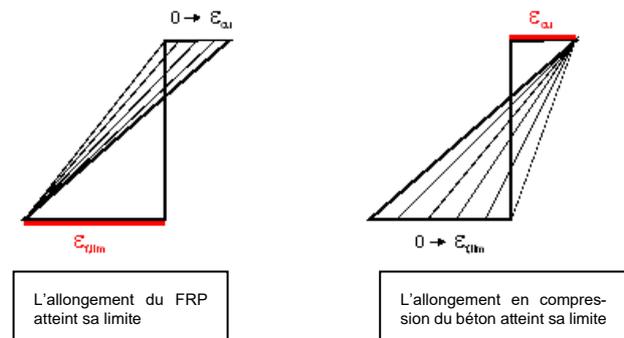
La résolution des conditions d'équilibre s'effectue itérativement en variant les allongements dans la zone comprimée et la zone tendue. Les conditions d'équilibre sont contrôlées en passant les différents états d'allongement.



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

4.7.2 État limite ultime

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



L'allongement du FRP atteint sa limite

L'allongement en compression du béton atteint sa limite

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

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

$$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 1/0.63 \quad (11)$$

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

$$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rd0}} \leq 1/0.5 \quad (12)$$

4.7.3 État de service

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

- Contrainte dans l'acier : $\sigma_{slim} = 0,80 f_{yk}$ 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 le composite : $\sigma_{flim} = \min(0.9 \sigma_{slim}, \sigma_{f,ELS})$ avec σ_{slim} la limite de la contrainte de traction des aciers. Tenir compte du rapport entre la fibre sèche et le composite pour les tissus.
- Contrainte dans les armatures de précontrainte : $\sigma_{plim} = 0,8 f_{pk}$ (cas de la précontrainte adhérente) sous combinaison caractéristique.

4.74 Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP

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

$$F_{bd} \geq F_{rd} \quad (13)$$

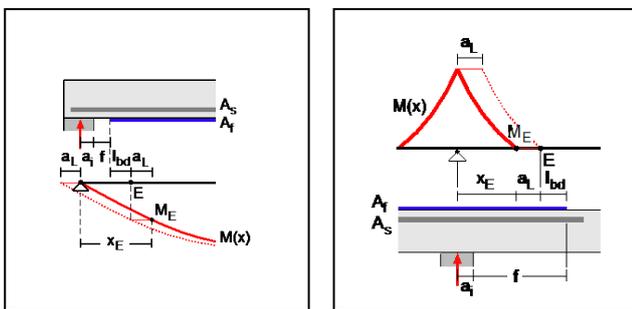
La force de traction FRP de calcul F_{rd} est déterminée par une itération de l'équilibre à partir du moment donné. F_{bd} est la valeur de dimensionnement de la force de rupture de l'adhérence au point E. Elle se calcule à partir des caractéristiques des sections FRP choisies et de la résistance respective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

4.82 Dimensionnement du renfort à l'effort tranchant

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

$$x_E = a_i + f + l_{bd} + a_L \quad \text{avec} \quad f \leq 5 \text{ cm} \quad (14)$$

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



4.75 Éléments en béton précontraint

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

Le logiciel ne prend en compte que la part du moment de précontrainte isostatique. Si l'élément précontraint est hyperstatique, il faut ajouter la part du moment hyperstatique de précontrainte $M_{p'}$ aux moments dus aux charges $MEK0$, $MEdf$ et $MEkf$.

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

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

4.76 Règles constructives pour tissu S&P C-Sheet

- Distance au bord : $a_{r,min} = c_w$ (15)
- Entraxe en fonction de la portée : $s_{r,max} = 0,2 \cdot l$ (16)
- Entraxe en fonction du porte-à-faux : $s_{r,max} = 0,4 \cdot l$ (17)
- Entraxe en fonction de l'ép. de la dalle : $s_{r,max} = 5 \cdot h$ (18)
- Nombre de couches de S&P C-Sheet : $n_{f,max} = 5$ (19)

4.8 Renforcement à l'effort tranchant

4.81 Principe

L'effort tranchant agissant est comparé aux valeurs de dimensionnement de la résistance à l'effort tranchant selon Eurocode 2. Au sujet de la résistance à l'effort tranchant il faut distinguer les 3 cas suivants :

- $V_{Edf} \leq V_{Rd,c}$ (20)
Si la sollicitation d'effort tranchant V_{Edf} de l'élément à renforcer est plus faible que l'effort tranchant $V_{Rd,c}$ admissible par le béton seul, aucun renfort à l'effort tranchant n'est nécessaire. Ce cas se présente généralement pour les dalles.
- $V_{Edf} \leq V_{Rd,s}$ (21)

Si la sollicitation d'effort tranchant à l'état renforcé peut être totalement reprise en utilisant l'armature d'étriers interne, aucun renfort à l'effort tranchant n'est nécessaire.

- $V_{Edf} > V_{Rd,s}$ (22)

Si la sollicitation d'effort tranchant à l'état renforcé dépasse la résistance à l'effort tranchant théorique de la section existante, le renfort de cisaillement est à dimensionner pour la différence de force :

$$\Delta V = V_{Edf} - V_{Rd,s} \quad (23)$$

Dans le cas présent, le renfort à l'effort tranchant doit être ancré dans la zone flexionnelle comprimée. L'ancrage dans la zone de compression est assuré si le renforcement entoure entièrement la poutre ou avec des dispositifs particuliers d'ancrage du tissu.

Le dimensionnement du renfort de cisaillement $a_{w,min}$ s'effectue selon la relation suivante :

$$a_{w,min} = \Delta V / (z_f \cdot \sigma_{fw}) \quad \text{avec} \quad \sigma_{fw} = \varepsilon_{fw,ELU} \cdot E_{fu} \quad (24)$$

avec $a_{w,min} = A_{w,min} / s_w$ et z_f calculé par itération ($z_f \sim 0,95 \cdot h$)

$a_{w,min}$: Renfort de cisaillement par mètre

$A_{w,min}$: Renfort de cisaillement par pièce

Pour éviter qu'une fissure d'effort tranchant puisse se former entre deux bandes de tissu, on limite l'espacement entre deux bandes de tissu à 80 % de la hauteur de l'élément de construction.

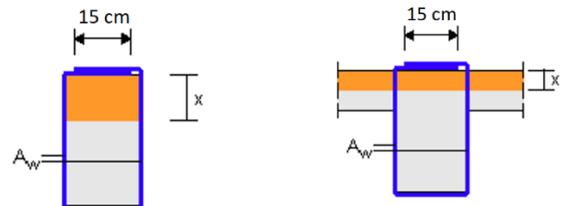
$$s_{w,max} = 0,8 \cdot h \quad (25)$$

Avant un ceinturage avec des tissus S&P C-Sheet il faut arrondir les arêtes de l'élément en béton avec le rayon minimal $r \geq 2,5 \text{ cm}$.

4.83 Ancrage des tissus dans la zone de compression

L'ancrage des tissus dans la zone de compression peut être effectué par enrobage total de l'âme de la section, fermé par recouvrement collé avec une longueur de recouvrement d'au moins 15 cm.

Dans ce cas, les renforcements à l'effort tranchant avec des moments négatifs (en supérieur) est possible avec le recouvrement des tissus dans la zone de compression qui est située en bas de la poutre.



Pour le renforcement d'effort tranchant avec le S&P C-SHEET 240, l'ancrage des tissus dans la zone de compression peut également être réalisé à l'aide d'éléments en acier comme représenté ci-dessous.

La nuance et la protection anti-corrosion seront à adapter en fonction de chaque chantier et cela afin de répondre aux questions de durabilités et atmosphériques (classes de corrosivité de l'atmosphère conformes à NF EN ISO 9223).

La nuance d'acier sera à minima de type S235.

La protection anticorrosion, peut-être de type :

- Protection par peinture anticorrosion : HYDROSOB de la société SOB Peinture ou équivalent ;
- Electro zingage, galvanisation : Galvanisation à 60 micromètres d'épaisseur, conformément aux prescriptions de la norme NF EN ISO 1461, par exemple ;
- Galvanisation et peinture ;
- Acier inoxydable de type A2 ou A4 : Acier inoxydable de classe 3041 (A2) ou 316L (A4), ou équivalent.

Dans tous les cas, il sera respecté les assemblages de système anticorrosion afin de ne pas créer de couple galvanique.

4.84 Dimensionnement des angles

Les angles (fer cornières) sont collés sur le tissu avec une longueur d'ancrage de 10 cm et boulonnées dans la dalle ainsi que dans l'âme de la poutre pour éviter la rotation de la cornière. Voir Annexe 4.

La nuance d'acier utilisée pour les cornières sera à minima de type S235. Elles auront pour dimensions minimales 60x60x5 mm.

Pour les poutres très élancées et uniquement en moment positif, un renfort en U sans ancrage en supérieur peut être envisagé. Il devra être confirmé par le calcul conformément aux recommandations l'AFGC 2011 §2.6.3, suivant le cas B.

5. Confinement de poteaux en béton

5.1 Principe

La capacité de charge de poteaux peut être augmentée si on confine le poteau avec des matériaux FRP. Le confinement empêche la déformation transversale du poteau, ce qui génère une contrainte tri-axiale dans le béton. La résistance à la compression du béton est ainsi augmentée.

Les calculs sont basés sur les hypothèses suivantes :

- Les poteaux ne sont pas exposés au flambage ($\lambda \leq 25$).
- Les poteaux ont une moindre excentricité de la charge ($e \leq 2\text{ cm}$).
- Les poteaux sont enveloppés complètement en S&P C-Sheet sur toute la hauteur.
- Il n'y a pas de glissement entre les renforts et le béton.
- Toutes les fibres du poteau comprimé subissent la même déformation longitudinale.

Le calcul est basé sur le concept de sécurité partiel de l'Eurocode 2 et le confinement est dimensionné selon le bulletin 14 de la fib (Fédération Internationale du Béton, 2001). La déformation maximale du béton est limitée à $\varepsilon_{c2u} = 2,0$ [‰] selon l'Eurocode 2. Le module d'élasticité E_c du béton utilisé représente la pente de la tangente à l'origine.

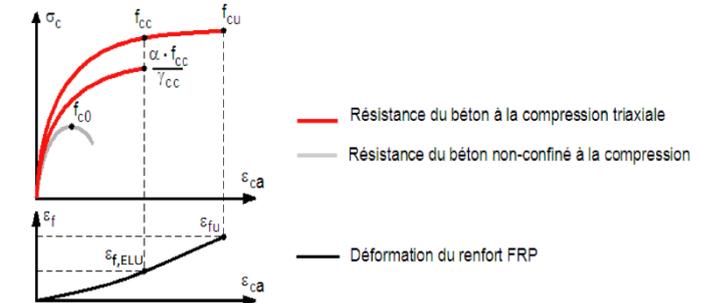
La compression effective induit par le confinement est déterminée comme suit :

$$\sigma_1 = \rho_f \cdot k_e \cdot E_{fd} \cdot \varepsilon_1 \text{ avec } \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{f,ELU} \quad (26)$$

La résistance à la compression du béton confiné se calcule selon la formule suivante :

$$f_{cc} = f_{c0} \cdot \left(2,254 \cdot \sqrt{1 + 7,94 \cdot \frac{\sigma_1}{f_{c0}}} - 2 \cdot \frac{\sigma_1}{f_{c0}} - 1,254 \right) \cdot \left(1,4 \cdot \frac{h}{b} - 0,6 \cdot \left(\frac{h}{b} \right)^2 - 0,8 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_1}{f_{c0}}} + 1 \right) \quad (27)$$

Le graphique montre la déformation du renfort FRP et le développement de la résistance à la compression du béton induit par la déformation axiale du poteau.



Les extrémités des fibres sont ancrées par chevauchement. Une longueur d'ancrage de 15 cm garantit la transmission de la force maximale du tissu. Cette longueur d'ancrage est calculée en admettant une résistance à la traction du support de 3 N/mm² entre les couches du tissu qui se touchent.

5.2 État limite ultime

Le modèle de design selon la fib est basé sur un processus itératif. La déformation axiale est augmentée graduellement et la contrainte correspondante du confinement est déterminée. On obtient l'état limite ultime lorsque le confinement FRP arrive à sa déformation limite.

L'allongement du confinement FRP est limité à :

$$\varepsilon_{f,ELU} = 4,0 \text{ [‰]} \quad (28)$$

La capacité portante du poteau renforcé est déterminée comme suit :

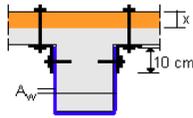
$$N_{Rdf} = (A_g - A_s) \cdot \frac{\alpha \cdot f_{cc, fib}}{\gamma_{cc}} + A_s \cdot \frac{f_s}{\gamma_s} \quad (29)$$

Le coefficient de sécurité du béton confiné est égal à la valeur du béton normal : $\gamma_{cc} = \gamma_c = 1,5$.

5.3 Poteau circulaire

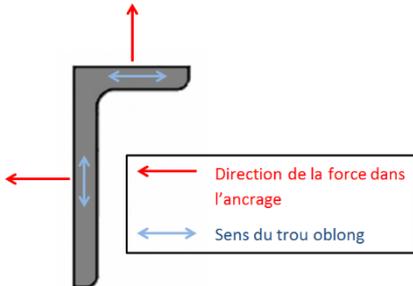
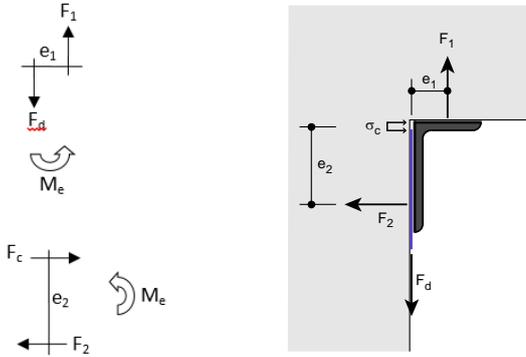
Pour renforcer des poteaux circulaires, la section confinée par le renfort FRP est supposée égale à la section totale du béton. Le facteur k_e est égal à 1. Le ratio d'armature se calcule comme suit :

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f}{D} \quad (30)$$



Les tiges filetées verticales reprennent les efforts du tissu. Les chevilles ou tiges filetées horizontales reprennent le moment d'excentricité.

Les chevilles seront dimensionnées conformément aux Evaluations Techniques Européennes.



$$F_1 = F_d$$

$$M_e = F_d \times e_1$$

avec

- F_d Effort du tissu ;
- F_1, F_2 Effort des chevilles ou des tiges filetées ;
- F_c, σ_c compression du béton ;
- M_e moment d'excentricité.

Dimensionnement de la cornière métallique

Afin d'éviter une plastification de l'acier de la cornière métallique le contrôle ci-dessous sera effectué :

$$f_{yd} \geq \frac{M_e}{w_s} + \frac{F_d}{A_s}$$

Avec :

- f_{yd} f_{yk} / γ_s
- f_{yk} Limite élastique caractéristique nominale de l'acier ;
- w_{sy} Moment résistant de la cornière ;
- A_s Section de la cornière $A_s = b_s \times t$;
- b_s Longueur de la cornière ;
- t épaisseur de la cornière.

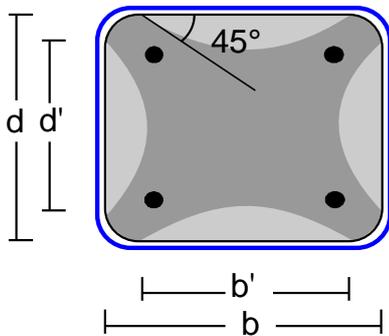
Dans le cas de l'utilisation de cornières métalliques, l'allongement maximal du tissu à l'ELU sera limité à $\varepsilon_{f,ELU} \leq 4$ ‰ et la contrainte de dimensionnement $\sigma_{f,ELU} \leq 800 \text{ MPa}$ conformément au §4.32.

5.4 Poteau rectangulaire

Pour les poteaux rectangulaires, l'état de contraintes triaxial engendré ne se répartit pas dans toute la section enveloppée par le renfort FRP, mais seulement dans une zone effective qui dépend de la géométrie du poteau. Un facteur de réduction prenant en compte les zones non-confinées est introduit. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la pression induite par les renforcements transversaux est uniformément répartie sur la circonférence. L'extension tridimensionnelle est prise en compte par le coefficient k_e :

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 A_g (1 - A_s / A_g)} \quad (31)$$

avec $b' = b - 2r$ et $d' = d - 2r$



Le ratio d'armature se calcule pour les directions x et y comme suit :

$$\rho_{fx} = \frac{2 \cdot t_f}{b} \quad \rho_{fy} = \frac{2 \cdot t_f}{d}$$

$$\text{Et } \rho_f = \max(\rho_{fx} ; \rho_{fy}) \quad (32)$$

Avant un enveloppement avec des tissus S&P C-Sheet il faut arrondir les arêtes de l'élément en béton avec le rayon minimal $r \geq 3,5$ cm.

Le renforcement n'est pas recommandé pour des poteaux rectangulaires dont le grand côté b est supérieur ou égal à 3 fois le petit côté d .

5.5 Disposition constructive

Si un élément structurel est complètement confiné par du renfort composite collé les échanges gazeux ne sont plus possibles (résine « étanche »). Dans ce cas de figure des dispositions particulières doivent être prises.

6. Préparation et contrôles

6.1 Détermination de la résistance à la traction du support

6.1.1 Cohésion du support

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

La valeur minimale de résistance à la traction du support β_t selon EN 1542 pour les tissus S&P C-Sheet est : > 1.5 N/mm²

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

La valeur moyenne β_t établie sur la base de 3 essais au minimum ne doit pas être inférieure à la valeur $\beta_t > 1.5$ N/mm².

6.1.2 Primaire

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

6.2 Planéité de la surface de béton préparée

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

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

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

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

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

6.2.1 Point particulier de préparation du support

Les angles et arêtes (renfort cisaillement des poutres ; enrobage de poteaux de section carré ou rectangulaire) seront arrondies avec un rayon minimum de 2.5 cm.

6.3 Détermination du point de rosée

Pour déterminer la température du point de rosée, il convient de mesurer l'humidité relative de l'air ainsi que la température de l'air. Pour évaluer le risque de formation d'eau de condensation, la température du point de rosée sera comparée à la température superficielle de l'élément de construction, celle-ci devant être au moins de 3 °C supérieure à la température du point de rosée (cf. tableau des points de rosée).

6.4 Humidité du support en béton

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

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

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

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

Humidité maximale du support en fonction des produits de collage

Produit de collage	Humidité maximale du support
S&P RESIN 220 / S&P Resin 220 HP	4 %
S&P Resin 230 / S&P Resin 230 HP	4 %
S&P RESIN 55 / S&P Resin 55 HP	4 %
S&P Resicem / S&P Resicem HP	10 %

6.4.1 Préparation mécanique du support

La préparation mécanique peut se faire par sablage, grenailage, fraissage ou par ponçage pour les petites surfaces, ou tout autre préparation assurant les caractéristiques minimums requises pour l'adhérence ($\beta_t > 1.5$ N/mm²). Un hydro sablage ou hydro décapage peut également convenir, mais dans ce cas un temps de séchage doit être observé avant la pose des tissus pour revenir à un taux d'humidité inférieur au maximum autorisé.

Avant collage, le support doit être parfaitement dépoussiéré

7. Mise en Œuvre

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

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

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

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

7.2 Mélange de la colle S&P Resicem ou S&P Resicem HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

Produit	D.P.U. à 20° C	Humidité du support	Température d'application
S&P Resicem	~ 50 min.	< 10 %	+8 °C à +35 °C
S&P Resicem HP	~ 45 min.		

7.3 Application de la résine pour S&P C-Sheet

Méthode 1 – Application par voie sèche :

Sur le support, la S&P Resicem ou S&P Resicem HP / S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP est appliquée de manière égale avec un pinceau ou un rouleau. Le S&P C-Sheet est ensuite appliqué sur l'élément et la feuille de protection est enlevée. Le S&P C-Sheet est marouflé avec une spatule en caoutchouc dur ou un rouleau lamineur spécial dans la résine S&P. Le rouleau ou la spatule sont tirés exclusivement dans le sens des fibres jusqu'à ce que toutes les fibres soient parfaitement tendues et humidifiées et intégrées dans la colle. Visuellement aucune inclusion d'air ne doit être présente.

Méthode 2 – Application par voie humide :

Le tissu est pré-imprégné de résine S&P Resicem ou S&P Resicem HP / S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP avant d'être appliqué sur le support. Pour les grandes surfaces, une machine « Encolleuse à tissus S&P » peut être utilisée.

Sur le support, la S&P Resicem ou S&P Resicem HP / S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP est appliquée de manière égale avec un pinceau ou un rouleau en une couche très mince. Le tissu pré-imprégné est déroulé et marouflé comme pour le tissu appliqué en voie sèche.

Le bon enrobage du S&P C-Sheet peut être vérifié visuellement sans problème.

En cas d'application ultérieure d'un revêtement de protection, un saupoudrage de sable de quartz propre, sec et calibré, doit être effectué sur la colle encore fraîche pour les 2 méthodes d'application.

7.4 Recouvrement / fixation du S&P C-Sheet

On respectera les longueurs minimales suivantes :

Produit	Recouvrement dans le sens des fibres	Transversalement au sens des fibres
S&P C-Sheet S&P 240	150 mm	Pas nécessaire
S&P C-Sheet S&P 640	150 mm	Pas nécessaire

7.5 Contrôles qualités après la pose

7.51 Liaison S&P C-Sheet, colle et béton

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

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

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

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

7.52 Planéité des éléments S&P C-Sheet collés

La planéité du S&P C-Sheet sera contrôlée immédiatement après l'application. L'écart entre une surface plane et une règle de 30 cm ne doit pas excéder $\Delta h = 1$ mm, resp. $\Delta h = 5$ mm sous une règle de 2 m pour les surfaces concaves.

7.53 Contrôle des vides dans la colle et entre la colle et le support

Après collage, le S&P C-Sheet sera contrôlé au maillet pour détecter les vides ou par caméra thermique, thermographie en régime transitoire.

8. Revêtement des éléments de renfort

8.1 Revêtements de protection

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

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

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

8.2 Protection au feu

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

(Coefficient ≥ 1 en situation accidentelle)

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

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

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

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

8.3 Protection à la température (en service)

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

Le procédé de renfort S&P C-Sheet sera protégé de l'exposition directe du rayonnement solaire par un revêtement.

9. Sécurité du travail

Allergies

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

Découpe S&P C-Sheet

Les poussières fines qui sont produites lors de la découpe peuvent être dangereuses pour la santé.

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

Traitement et gestions des déchets des résines époxy

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

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

B. Résultats expérimentaux

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

C. Références

C1. Données Environnementales.¹

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

C2. Autres références

C-Sheet 240

- Centre Commercial Le Merlan, Marseille, année 2018 ;
- Centre Commercial Casino, Le Cannet, année 2018 ;
- Centre Commercial Leclerc, Clichy, année 2018 ;
- Palace center, Mandelieu, année 2018 ;
- CHU, Limoges, année 2018 ;
- Gare SNCF, L'Etang La Ville, année 2018 ;
- Cimenterie Lafarge, Bouc Bel Air, année 2018.

C-Sheet 640

- Grand carré Jaude, Clermont Ferrand, année 2013;
- Garage Citroën, Lyon, année 2014.

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

Tableaux et figures du Dossier Technique

Annexe 1

Essais d'adhérence

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

Elément :	collé le :
Colle :	Température : °C de l'élément
Préconditionnement :	
Diamètre des rondelles : 50 mm	Surface d'adhérence A_0 : 1962.5 mm²

Appareil d'essai d'adhérence:

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

Tampon, Signature:

Annexe 2

Fiche d'autocontrôle type

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

Les mesures suivantes doivent être effectuées et enregistrées :

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

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

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

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

Tampon, Signature :

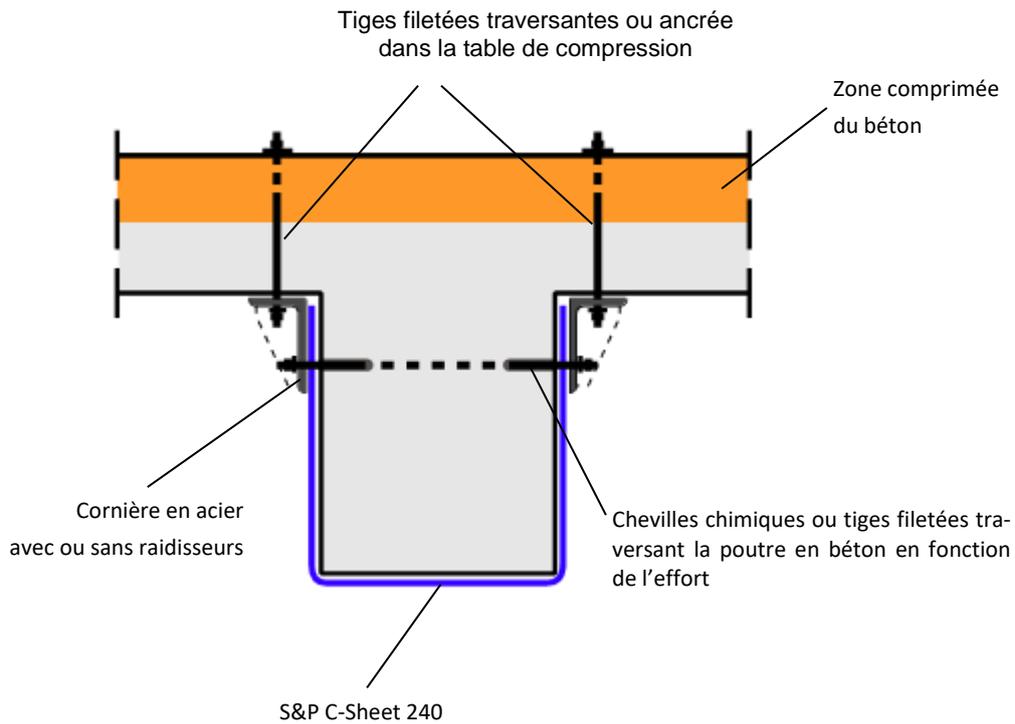
Tableau des points de rosée

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

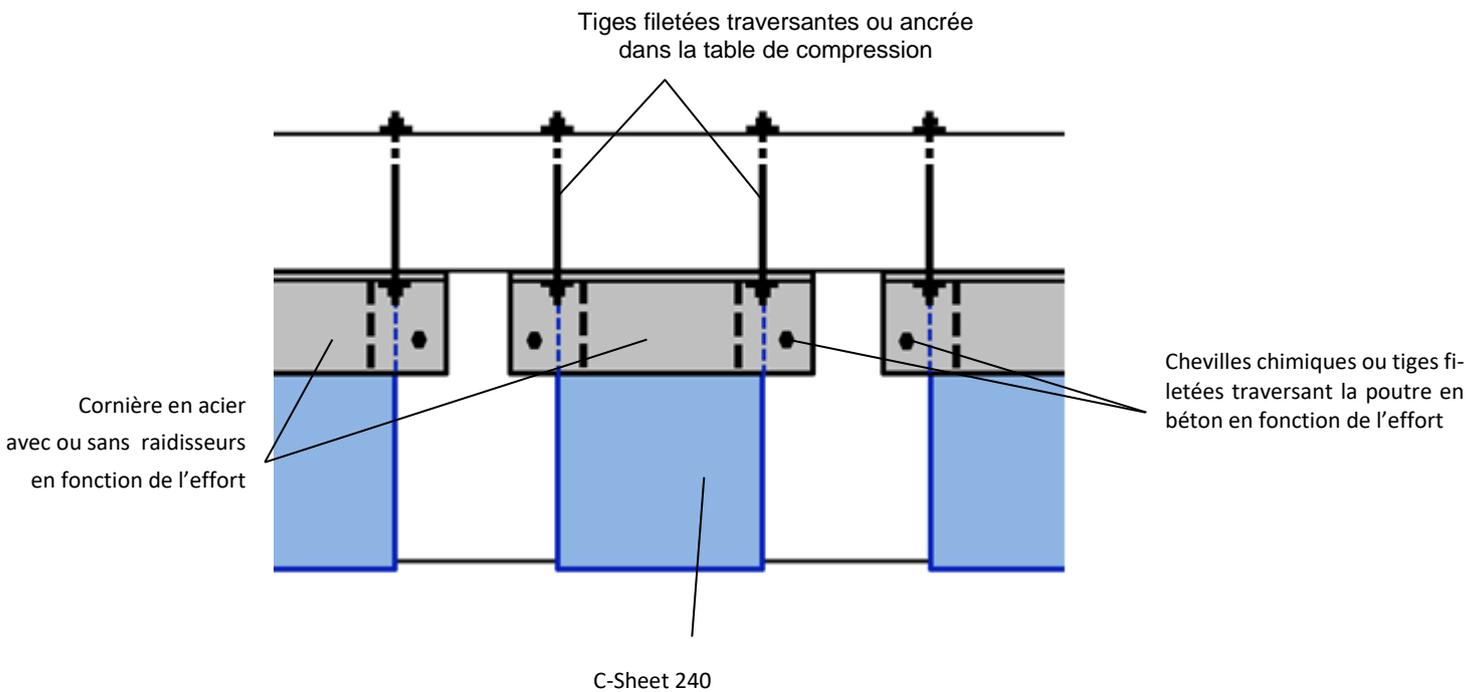
Le tableau indique, en fonction de la température de l'air et de l'humidité de l'air relative, à quelles températures de surface une condensation apparaît. Ainsi, p. ex. une température de l'air de 20 °C et d'une humidité de l'air relative de 70 %, une condensation apparaîtra sur des surfaces non absorbantes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

A-Principe de construction

COUPE TYPE



VUE LATÉRALE



1 Hypothèses de calculs

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

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

2 Notations utilisées

Géométrie :

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

Matériaux :

$f_{cj} (f_{tj})$:	résistance caractéristique à la compression (traction) du béton à j jours
f_e :	limite d'élasticité de l'acier
f_{ed} :	contrainte de dimensionnement retenue pour l'acier ($f_{ed}=f_e/\gamma_s$)
f_{cd} :	contrainte de dimensionnement retenue pour le béton ($f_{cd}=0.85 f_{c28}/(\theta\gamma_b)$)
σ_{bc} :	contrainte dans le béton
σ_s :	contrainte dans l'acier tendu
σ_{sc} :	contrainte dans l'acier comprimé
σ_f :	contrainte dans les fibres
n :	coefficient d'équivalence acier /béton ($n=E_s/E_b$) pris égal à 15 (BAEL A4.5,1)
n' :	coefficient d'équivalence fibres/béton ($n'=E_f/E_b$)
E_f :	module d'élasticité de la fibre utilisée

Sollicitations :

M_u :	moment sollicitant la section à l'ELU
M_s :	moment sollicitant la section à l'ELS
V_u :	tranchant sollicitant la section à l'ELU
τ_u :	contrainte tangente à l'ELU

Calcul BA ELU-ELS:

Y_u :	distance de l'Axe Neutre à la déformation de la fibre la plus comprimée (ELU)
Z :	bras de levier
I_1 :	moment d'inertie de la section homogène

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

Calcul BP ELU-ELS :

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

3 Caractéristiques techniques des produits

3.1 Loi de comportement des armatures carbone (tissus)

S&P C-sheet 240 & S&P C-sheet 640

Les lois de comportement ainsi que les valeurs de calculs sont identiques au paragraphe correspondant du DTED.

3.2 Caractéristiques des résines S&P

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

Les lois de comportement ainsi que les valeurs de calculs sont identiques au paragraphe correspondant du DTED.

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

Les lois de comportement ainsi que les valeurs de calculs sont identiques au paragraphe correspondant du DTED.

S&P Resicem et S&P Resicem HP

Les lois de comportement ainsi que les valeurs de calculs sont identiques au paragraphe correspondant du DTED.

4 Méthode simplifiée du calcul au BAEL 91 rév. 99

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

Condition préalable :

Renforcement en flexion :

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

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

Avec

$$z = 0,5 \cdot h \cdot (1 + \sqrt{1 - 2\mu_u})$$

Et

$$\mu_u = \frac{M_u + A_s \cdot f_{ed} \cdot (h - d) - A_{s'} \cdot f_{ed} \cdot (h - d')}{b_0 \cdot f_{ed} \cdot h^2}$$

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

- le béton : $\sigma_{bcTOT} = \Delta\sigma_{bc} + \Delta\sigma_{bc} < 0,6 \cdot f_{C28}$
- l'acier comprimé : $\sigma_{scTOT} = \sigma_{sc} + \Delta\sigma_{sc} < \bar{\sigma}_s$
- l'acier tendu : $\sigma_{sTOT} = \sigma_s + \Delta\sigma_s < \bar{\sigma}_s$
- la fibre : $\sigma_{f,lim} = \min\{\sigma_{f,d}; 450MPa\}$

NOTA :

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

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

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

3/ Contrainte de glissement

On note :

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

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

$$F_l = A_L \times f_{fd} = 0,5 \times S \times \frac{L_f}{2}$$

La contrainte de glissement est égale à :

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

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

4.2 Adhérence et vérification d'extrémité S&P C-Sheet.

Le principe de calcul est identique aux méthodes de calcul du DTED pour les tissus S&P C-Sheet en vérifiant que $F_{bd} \geq F_{fd}$

5 Principe de dimensionnement vis à vis de l'effort tranchant

En cas d'insuffisance d'armatures d'effort tranchant, on procède par analogie au calcul béton armé (méthode de BRESSON).

On détermine tout d'abord l'effort maximal pouvant être repris par les aciers existants et le béton le cas échéant. L'effort à reprendre par le tissu est alors égal à la différence entre l'effort tranchant calculé et l'effort tranchant repris par les aciers existants et le béton.

• Formulation générale :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_0 \times d}$$

$$V_u = V_{u \text{ acier}} + V_{u \text{ béton}} + V_{u \text{ fibres}}$$

$$V_{u \text{ béton}} = 0,3 \times k \times f_{tj} \times b_0 \times d$$

$$V_{u \text{ acier}} = \frac{A_t}{s_t} \times 0,9 \times d \times \sigma_{sd} \times (\cotan \beta + \cotan \alpha) \times \sin \beta$$

$$V_{u \text{ fibres}} = \frac{A_f}{s_f} \times z \times f_f d \times (\cotan \beta + \cotan \alpha) \times \sin \beta$$

Valeur à retenir pour le bras de levier:

Lors du dimensionnement, il est intéressant de différencier les 2 mises en œuvre possibles :

- le renforcement entoure entièrement la poutre, ou des dispositifs particuliers permettent l'ancrage du tissu dans la zone de béton comprimé.
- Le renforcement est disposé sur les joues de la poutre, avec un retour horizontal et sans dispositifs d'ancrage particuliers. Cette disposition est retenue généralement dans le cas d'une poutre surmontée d'une dalle.

Reprise de l'effort tranchant dans le cas où l'ancrage dans la zone comprimée du béton est assuré

- *Enrobage complet* : $z = 0,9 h$
- *Ancrage dans la zone comprimée* : $z = \min (0,9 h ; h_{renfort})$

Reprise de l'effort tranchant dans le cas où l'ancrage dans la zone comprimée du béton n'est pas assuré
On procède selon la méthode de l'AFGC : le bras de levier est pris égal à la retombée de la poutre diminuée de la longueur de collage.

$$z = h_{retombée} - l_{collage} \text{ si retour horizontal}$$

$$z = h_{retombée} - 2 \times l_{collage} \text{ sinon } l_{collage} = 100 \text{ mm}$$

$$A_f = 2 \times t_f \times b_f$$

• dispositions constructives à respecter lors de la mise en œuvre du tissu de fibres de carbone

De manière à éviter qu'une fissure d'effort tranchant puisse se former entre 2 bandes de tissu, on limite l'espacement entre 2 bandes à 80% de la hauteur de la poutre, $0,8 \times h$.

Tissu comme ancré dans la table de compression :

Le système à retenir est identique à ceux proposés dans le paragraphe correspondant du DTED.

Cas particulier d'un élément soumis à des moments négatifs :

Le tissu entourera complètement l'élément comme proposé au paragraphe correspondant du DTED.

6 Structures en béton précontraint

6.1 Calcul du renforcement vis à vis de la flexion

•Condition préalable :

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

•Vérification ELS :

- en classe 2 :

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

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

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

Sous combinaison fréquente : 0 dans la section d'enrobage

- en classe 3 :

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

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

Etape 2 : chargement de la structure renforcée

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

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

Les limitations sont les suivantes :

- pour le béton :

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

- pour les aciers passifs :

En combinaison rare : $\bar{\sigma}_s = \max\{\frac{2}{3}f_{te}; 110\sqrt{\eta \times f_{tj}}\}$

En combinaison fréquente : $0,35f_e$

- pour les aciers de précontraintes : (exploitation)

En combinaison rare : la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à :

$0,1f_{prg}$ pour la post tension

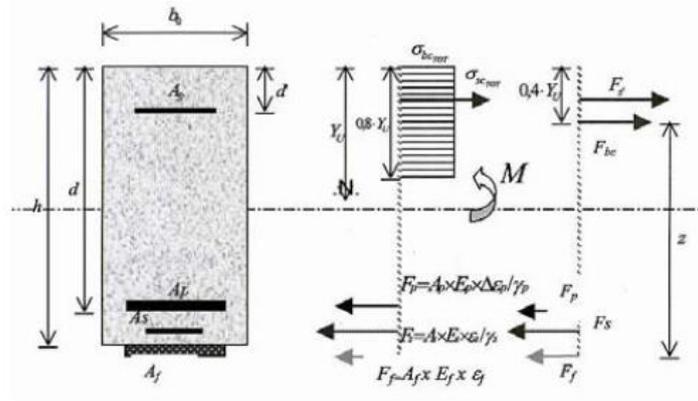
$\min\{0,1 \times f_{prg}; 150\eta_p\}$ pour la prétension

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

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

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

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



- Aciers minimum :

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

$$A_{s\text{mini}} = \frac{B_t}{1000} + \frac{N_{Bt}}{\sigma_{Bt}} \times \frac{f_{tj}}{f_s}$$

6.2 Calcul du renforcement vis à vis de l'effort tranchant

- Vérification ELS : les renforcements FRP n'ont pas de rôle à l'ELS

La bielle d'about doit être vérifiée sur le béton seul sans tenir compte du renforcement.

- Vérification ELU

La méthode utilisée est celle du BPEL en inscrivant que l'effort tranchant réduit est repris par le béton, les aciers existants et les fibres rajoutées.

$$\tau_u \text{ réduit} = \tau_u \text{ acier} + \tau_u \text{ béton} + \tau_u \text{ fibres}$$

Où

$$\tau_u \text{ acier} = \frac{A_s \cdot f_s \cdot \sin(\alpha + \beta_u)}{b_n \cdot s_t \cdot \gamma_s \cdot \sin \beta_u} + \frac{F_{tu} \cdot \sin(\alpha + \beta_u)}{b_n \cdot s'_t \cdot \sin \beta_u}$$

$$\tau_u \text{ béton} = \frac{f_{tj}}{3}$$

$$\tau_u \text{ fibres} = \frac{A_f}{b_n \times s_f} \times f_{fd} \times \frac{\sin(\alpha + \beta_u)}{\sin \beta_u}$$

$$\tan 2\beta_u = \frac{2 \cdot \tau_u}{\sigma_{xu} - \sigma_{ru}}$$

Les bras de levier pour le calcul de la fibre sont pris égaux à : (cf. §3.4)

- Min (0.9h ; h_{renfort}) si ancrage dans la zone comprimée est assuré
- $h - l_{\text{collage}}$ sinon (avec retour horizontal)
- $h - 2 \cdot l_{\text{collage}}$ sinon (sans retour horizontal)

La section de fibres à disposer est égale à : $A_f = 2 \times t_f \times b_f$