

Sur le procédé

## SYSTÈME S&P C-Sheet

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

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

### AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

## Versions du document

Version	Description	Rapporteur	Président
V3	<p>Cette version, examinée le 04 mars 2025, annule et remplace l'avis technique n° 3.3/19-989_V2. Elle intègre les modifications suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ajout des mèches d'ancrage en fibre de carbone ;</li> <li>- Suppression des résines S&amp;P Resin 55 et S&amp;P Resicem ;</li> <li>- Suppression du tissu S&amp;P C-Sheet 640.</li> </ul>	PAYET Loïc	BERNARDIN-EZRAN Roseline
V2			

### Descripteur :

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

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

Voir Annexe 1 pour le détail des propriétés mécaniques.

## Table des matières

1.	Avis du Groupe Spécialisé.....	5
1.1.	Domaine d'emploi accepté.....	5
1.1.1.	Zone géographique.....	5
1.1.2.	Ouvrages visés.....	5
1.2.	Appréciation.....	6
1.2.1.	Aptitude à l'emploi du procédé.....	6
1.2.2.	Durabilité.....	6
1.2.3.	Impacts environnementaux.....	6
1.3.	Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé.....	6
2.	Dossier Technique.....	8
2.1.	Mode de commercialisation.....	8
2.1.1.	Coordonnées.....	8
2.1.2.	Identification de composants.....	8
2.2.	Description.....	8
2.2.1.	Principe.....	8
2.2.2.	Caractéristiques des composants.....	8
2.3.	Produits complémentaires.....	11
2.3.1.	S&P Resin 230 et S&P Resin 230 HP - Mortiers de reprofilage des supports.....	11
2.3.2.	S&P TECNOGROUT-FIB : Mortier de réparation structurelle.....	11
2.3.3.	S&P TECNOGROUT-N : mortier de réparation coulable.....	11
2.3.4.	S&P Tecnoimper-Flex : Revêtement souple d'imperméabilisation.....	11
2.3.5.	S&P Tecnopint : Revêtement de protection.....	11
2.3.6.	S&P ResAC-19.....	11
2.3.7.	Pièces métalliques et ancrages.....	12
2.4.	Dispositions de conception.....	12
2.4.1.	Dispositions générales.....	12
2.4.2.	Dimensionnement des renforcements à la flexion.....	17
2.4.3.	Dimensionnement des renforcements à l'effort tranchant.....	22
2.4.4.	Dimensionnement des renforcements des poteaux en béton.....	25
2.4.5.	Dimensionnement des dispositifs d'ancrage.....	26
2.4.6.	Règles constructives.....	28
2.5.	Dispositions de mise en œuvre.....	28
2.5.1.	Préparation et contrôles préliminaires.....	29
2.5.2.	Mise en œuvre du procédé.....	30
2.5.3.	Revêtement des éléments de renfort.....	31
2.6.	Assistance technique.....	31
2.7.	Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication.....	31
2.8.	Mention des justifications.....	32
2.8.1.	Résultats expérimentaux.....	32
2.8.2.	Références chantiers.....	32
	Annexe 1 : caractéristiques mécaniques du composite :.....	33
	Tableau A1-1 : Caractéristiques du composite à la flexion.....	33
	Tableau A1-2 : Caractéristiques du composite à l'effort tranchant.....	33
	Tableau A1-3 : Caractéristiques des C-Anchors.....	33
	Annexe 2 : Essais d'adhérence suivant NF EN 1542.....	34
	Annexe 3 : Fiche d'autocontrôle type.....	35
	Annexe 4 : Tableau des points de rosée.....	36

Annexe 5 - Ancrages métalliques..... 37

# 1. Avis du Groupe Spécialisé

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

---

## 1.1. Domaine d'emploi accepté

---

### 1.1.1. Zone géographique

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

### 1.1.2. Ouvrages visés

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 et 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 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.

Le procédé S&P C-Sheet est utilisé pour le renforcement à l'effort tranchant, le renforcement à la flexion et le renforcement à la compression des poteaux. Dans le cas d'une poutre renforcée à la flexion et à l'effort tranchant, la section de poutre prise en compte pour le dimensionnement doit être la même que celle prise pour le dimensionnement à l'effort tranchant.

En l'absence d'utilisation d'un système d'ancrage dans la hauteur comprimée de la poutre, la contribution du renforcement composite pour les vérifications vis-à-vis de l'effort tranchant ( $V_{Rd,f}$ ) doit être effectuées sur la section réduite de la poutre à renforcer (sans prise en compte de la table de compression des sections en T). Le renforcement à l'effort tranchant sans ceinturage complet n'est pas admis dans le cas d'un moment négatif sur l'appui considéré.

Le renforcement des dallages ou le renforcement à l'effort tranchant des dalles n'est pas visé par cet Avis Technique.

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

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

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

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 et métal), sortent du champ du présent Avis.

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

- 47°C en pointe (durée ≤ 24h) et 37°C en service continu (durée > 24h) pour S&P Resin 220 ;
- 52°C en pointe (durée ≤ 24h) et 40°C en service continu (durée > 24h) pour les S&P Resin 220 HP ;
- 48°C en pointe (durée ≤ 24h) et 37°C en service continu (durée > 24h) pour les S&P Resin 55 HP et S&P Resicem HP.

Les renforcements d'ouvrages doivent être calculés conformément aux règles présentées dans la suite du présent Dossier Technique. Celles-ci se réfèrent au BAEL 91/99 (Recommandations de l'AFGC de 2003 révisées 2007) et aux Eurocodes (Recommandations de l'AFGC de 2011).

L'utilisation du procédé sur support ruisselant est exclue du domaine d'emploi.

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

- Surface du béton de cohésion superficielle inférieure à  $f_{tk} = 1,5$  MPa ;
- Support béton de résistance à la compression inférieure à  $f_{ck} = 12$  MPa.

Les S&P C-Sheet peuvent être associés aux S&P C-Laminate et au S&P C-Prestess faisant l'objet d'Avis Techniques en cours de validité.

---

## 1.2. Appréciation

---

### 1.2.1. Aptitude à l'emploi du procédé

#### 1.2.1.1. Stabilité

L'utilisation du procédé conduit à l'augmentation des capacités résistantes des éléments renforcés, conformément aux modèles de calcul développés dans le Dossier Technique, à condition de respecter strictement les prescriptions données dans le présent Avis Technique.

#### 1.2.1.2. Sécurité en cas d'incendie

##### 1.2.1.2.1. Réaction au feu

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

##### 1.2.1.2.2. Résistance au feu

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

#### 1.2.1.3. Prévention des accidents lors de la mise en œuvre

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

### 1.2.2. Durabilité

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

Comme précisé auparavant, 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 (valeur de pointe : valeur dont la durée de maintien est inférieure à 24 heures) de la résine utilisée (cf. §1.1.2).

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 paragraphe 2.2.2.3.3 du présent Avis.

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

### 1.2.3. Impacts environnementaux

#### 1.2.3.1. 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

#### 1.2.3.2. Données environnementales

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

---

## 1.3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

---

Le Groupe Spécialisé n°3 a fixé au §1.1.2 des limites de température en service continu en fonction de la résine utilisée pour la stratification des renforts. Ces valeurs ont été définies en fonction de la température de transition vitreuse des résines et correspondent à celle pour laquelle le module de la colle commence à diminuer.

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.

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.

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.

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.

Enfin, le Groupe Spécialisé 3.3 tient à souligner que l'utilisation des revêtements de protection décrits dans le Dossier Technique établi par le Demandeur ne permet pas de se dispenser du respect du Domaine d'emploi accepté, notamment pour les bâtiments industriels.

## 2. Dossier Technique

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

---

### 2.1. Mode de commercialisation

---

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

#### 2.1.1. Coordonnées

Titulaire : Société Simpson Strong-Tie France (exploitant de la marques S&P Reinforcement France)

Z.A.C des Quatre Chemins 85400 Sainte Gemme La Plaine.

France

Tél. : 02 51 28 44 00

Email : info@sp-reinforcement.fr

Site Internet : www.sp-reinforcement.fr

#### 2.1.2. Identification de composants

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

- Tissus en fibre de carbone unidirectionnelles S&P C-Sheet 240 : présentation en rouleaux complets ou découpés. Les tissus sont identifiés par leur dénomination et un numéro de lot, imprimés sur chaque rouleau complet. Ces tissus sont livrés prédécoupés en usine sur mesure ou en rouleaux de 100 mètres (S&P C-Sheet 240).
- S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP, colles 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 55 HP, colles pour tissus S&P C-Sheet et la stratification de la mèche d'ancrage S&P C-Anchor : 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/kit ou autres conditionnements sur demande.
- S&P Resicem HP, colles pour S&P C-Sheet : Colles époxydiques tri-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en pots métalliques de 10 kg/kit ou autres conditionnements sur demande.
- Mèche d'ancrage S&P C-Anchor : mèche d'ancrage en carbone pour l'ancrage des tissus avec une partie pré-durcie en usine pour faciliter son installation.
- S&P ResEP-16 : Résine de scellement chimique époxy en cartouche pour le scellement de la partie pré-durcie de S&P C-Anchor.

Le stockage des résines doit se faire dans un endroit tempéré à l'abri de l'humidité et du gel.

---

### 2.2. Description

---

#### 2.2.1. 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, collés à l'aide d'une résine époxydique, en différents grammages et différentes largeurs permettent un renfort à la flexion, à la compression et au cisaillement.

Ce procédé est destiné à augmenter la capacité portante des éléments en béton armé ou en béton précontraint, par fonctionnement mécanique conjoint du renfort et de l'élément renforcé à l'aide de l'adhérence de la résine après son durcissement.

#### 2.2.2. Caractéristiques des composants

##### 2.2.2.1. Tissus S&P C-Sheet

Les tissus S&P C-Sheet sont disponibles avec un module de 240 GPa.

##### Identification et marquage :

Exemple de désignation : S&P C-Sheet 240 200g/m<sup>2</sup>, référence de tissus de module 240 GPa, de grammage 200 grammes de fibres de carbone par mètre carré et de largeur 300 mm ou 600mm. Le numéro de lot et la désignation sont apposés sur chaque rouleau.

**Contrôle :**

Chaque lot de fibre livré fait l'objet d'essais de contrôle interne, portant sur le module d'élasticité et l'allongement à rupture. 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). S&P produisant ses tissus dans sa propre usine ils peuvent être obtenus, sur commande, dans d'autres dimensions avec les mêmes caractéristiques.

- Couleur : noir ;
- Taux de fibre : min. 100% ;

**2.2.2.1.1. Caractéristiques techniques du tissu C-Sheet 240**

Caractéristiques techniques des tissus S&P C-Sheet 240 (unidirectionnel)	Poids des fibres [g/m <sup>2</sup> ] (sens longitudinal)	Poids au m <sup>2</sup> Sheet [g/m <sup>2</sup> ]	Masse volumique [g/cm <sup>3</sup> ]	Allongement à la rupture [%]	Épaisseur de dimensionnement (poids des fibres/densité) [mm]	Section théorique de dimensionnement, largeur de 1000 mm [mm <sup>2</sup> ]	Livraison en rouleaux
<b>200 g/m<sup>2</sup></b>	200	230	1,77	1,55	0,113	113	Largeur : 300 ou 600 mm Fabrication spéciale d'autres largeurs
<b>300 g/m<sup>2</sup></b>	300	330	1,8	1,55	0,167	167	
<b>400 g/m<sup>2</sup></b>	400	430	1,8	1,55	0,222	222	
<b>600 g/m<sup>2</sup> (Fabrication spéciale)</b>	600	630	1,8	1,55	0,333	333	

**2.2.2.2. Ancrage carbone S&P C-Anchor**

Les ancrages S&P C-Anchor sont des ancrages en fibre de carbone à haute résistance conçus pour être stratifiés uniquement avec la résine S&P Resin 55 HP afin de créer un système en polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP), améliorant l'ancrage des systèmes FRP de S&P. S&P C-Anchor a été développé avec une partie pré-durcie en usine avec une résine époxy pour faciliter l'installation sur le chantier et augmenter la qualité de l'ancrage des tissus S&P C-Sheet. La partie pré durcie est scellée dans le béton à l'aide de la résine ResEp-16.

Données techniques	Unité	Valeur
Diamètre de la partie pré-durcie en usine	mm	10
Module d'élasticité de la fibre de carbone	kN/mm <sup>2</sup>	≥ 240
Résistance à la traction de la fibre de carbone	N/mm <sup>2</sup>	≥ 4000
Allongement à la rupture de la fibre de carbone	%	1,7

Les valeurs indiquées sont des valeurs relatives aux fibres de carbone utilisées.

Le schéma présentant les mèches d'ancrage S&P et ses dimensions se trouve dans le paragraphe § 2.4.5.3

**2.2.2.3. Résines de reprofilage et d'imprégnation des tissus****2.2.2.3.1. S&P Resin 220 et S&P Resin 220 HP - Colle pour reprofilage faible épaisseur**

Colles époxy bi-composant pour des reprofilages jusqu'à 5 mm d'épaisseur

Caractéristique	S&P Resin 220	S&P Resin 220 HP
Masse volumique	~ 1,75 kg/l	1,55 – 1,65 kg/l
Délai de durcissement total	~ 3 jours	~ 7 jours
Épaisseur d'application	1 à 3 mm	
Température d'application	+8 °C à +35 °C	
Résistance à la traction sur béton	> 3,0 N/mm <sup>2</sup> (Rupture dans le béton)	
Humidité du support à l'application	< 4 %	
Résistance à la traction sur acier	≥ 14 MPa	≥ 14 MPa
DPU à 21°	~ 60 min.	~ 90 min.

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

**2.2.2.3.2. S&P Resin 55 HP - Colles pour S&P C-Sheet 240**

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

Caractéristique	S&P Resin 55 HP
Masse volumique	1,0 – 1,1 kg/l
Délai de durcissement total	~ 7 jours
Épaisseur d'application	Voir consommation ci-après
Température d'application	+8 °C à +35 °C
Résistance à la traction sur béton	> 3,0 N/mm <sup>2</sup> (Rupture dans le béton)
Humidité du support à l'application	< 4 %
Résistance à la traction sur acier	≥ 14 MPa
DPU à 21°C	~ 45 min.

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

**2.2.2.3.3. S&P Resicem HP - Colles pour S&P C-Sheet 240**

Colle époxy/ciment pour le collage des tissus S&P C-Sheet ; en cas d'emballage complet d'un élément en béton, la S&P Resicem HP améliore les échanges de vapeur entre le béton et l'environnement extérieur.

Caractéristique	S&P Resicem HP
Masse volumique	1,4 – 1,5 kg/l
Délai de durcissement total	~ 7 jours
Épaisseur d'application	Voir consommation ci-après
Température d'application	+8 °C à +35 °C
Résistance à la traction sur béton	> 3,0 N/mm <sup>2</sup> (Rupture dans le béton)
Humidité du support à l'application	< 10 %
Résistance à la traction sur acier	≥ 14 MPa
DPU à 21°C	~ 45 min.

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

#### 2.2.2.3.4. Températures d'utilisation

	<b>S&amp;P Resin 220</b>	<b>S&amp;P Resin 220 HP</b>	<b>S&amp;P Resin 55 HP</b>	<b>S&amp;P Resicem HP</b>
Température de transition vitreuse	<b>53°C</b>	<b>58°C</b>	<b>53,5 °C</b>	<b>53,5°C</b>
En service continu (Durée > 24h)	37°C	40°C	38 °C	38°C
En pointe (Durée ≤ 24h)	47°C	52°C	48 °C	48°C

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

#### 2.2.2.3.5. Consommation S&P C-Sheet

La consommation dépend de la planéité, de la rugosité et de la porosité de la surface d'application. La consommation effective peut donc varier.

<b>Largeur de Tissu</b>	<b>Consommation de S&amp;P Resin 55 HP</b>	<b>Consommation de S&amp;P Resicem HP</b>
S&P C-Sheet 240 (200 g/m <sup>2</sup> )	~ 600 – 800 g/m <sup>2</sup>	~ 1100 – 1500 g/m <sup>2</sup>
S&P C-Sheet 240 (300 g/m <sup>2</sup> )	~ 700 – 1000 g/m <sup>2</sup>	~ 1300 – 1600 g/m <sup>2</sup>
S&P C-Sheet 240 (400 g/m <sup>2</sup> )	~ 900 – 1300 g/m <sup>2</sup>	~ 1400 – 1800 g/m <sup>2</sup>
S&P C-Sheet 240 (600 g/m <sup>2</sup> )	~ 1100 – 1500 g/m <sup>2</sup>	~ 1500 – 1900 g/m <sup>2</sup>

#### 2.2.2.4. Résine de scellement des S&P C-Anchor – S&P ResEP-16

La ResEP-16 de S&P est une résine de scellement chimique époxy. Elle est utilisée pour le scellement de la partie pré-durcie des S&P C-Anchor. Elle est parfaitement adaptée pour toutes applications de fixations dans le béton fissuré ou non fissuré. Elle fait l'objet d'un marquage CE suivant ATE ETA-16/0696..

### 2.3. Produits complémentaires

#### 2.3.1. S&P Resin 230 et S&P Resin 230 HP - Mortiers de reprofilage des supports

Mortier époxy bi-composant utilisé pour aplanir le support (si nécessaire) avant application du tissu S&P C-Sheet (marquage CE suivant la norme EN 1504-3 : 2004).

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

Mortier hydraulique R4 utilisé pour les travaux de réparation structurelle et les travaux de ragréage (marquage CE suivant la norme EN 1504-3).

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

Mortier hydraulique R4 utilisé pour les travaux de réparation structurelle (marquage CE suivant la norme EN 1504-3 :2005 & En 1504-6 :2006).

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

Revêtement sous forme de mortier élastique à deux composants. Il est destiné à la protection et l'imperméabilisation des structures en béton. (marquage CE suivant la norme EN 1504-2 :2004).

Le S&P Tecnoimper-Flex est développé pour avoir une parfaite adhérence sur les systèmes S&P C-Sheet.

#### 2.3.5. S&P Tecnopint : Revêtement de protection

Revêtement à base de résines acryliques en dispersion aqueuse, mono composante, élastique et imperméable, pour la protection des structures en béton (marquage CE suivant la norme EN 1504-2).

Le S&P Tecnopint est développé pour avoir une parfaite adhérence sur les systèmes S&P C-Sheet.

#### 2.3.6. S&P ResAC-19

La ResAC-19 est une résine de scellement qui convient pour des applications de fixation à haute performance dans le béton fissuré et le béton non fissuré.

La ResAC-19 est conçue comme une résine d'ancrage à durcissement rapide et à haute résistance pour des charges élevées et des fixations critiques et en sous face, en particulier dans des environnements corrosifs ou des conditions humides.

La couleur de la résine passe du bleu au gris pendant le processus de durcissement. Une fois la couleur grise obtenue, l'ancrage peut être mis en charge (marquage CE suivant ATE tiges béton ETA-23/0253, ATE fer à béton ETA-23/0255, ATE tiges maçonneries ETA-23/0254)

### 2.3.7. Pièces métalliques et ancrages

Les pièces 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 répondant 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-19 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).

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

---

## 2.4. Dispositions de conception

---

### 2.4.1. Dispositions générales

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 règlements BAEL et BPEL 91 révisés 99. Le dimensionnement est réalisé par un bureau d'étude spécialisé dans le calcul de renforcement de structure.

#### 2.4.1.1. Notations utilisées

##### **Géométrie :**

$b_0$  : largeur de la section

$h$  : hauteur de la section

$d$  : hauteur utile

$A_s(A_{sr})$  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

$\alpha$  : angle des armatures transversales avec la fibre moyenne de la poutre

$\beta$  : angle d'inclinaison des bielles d'about

##### **Notations Matériaux FRP**

$E_{fu}$  : module d'élasticité moyen du matériau FRP

$E_{fk}$  : module d'élasticité caractéristique du matériau FRP (valeur fractile 5%)

$\varepsilon_{fu}$  : allongement moyen à la rupture du matériau FRP

$\varepsilon_{fk}$  : 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

$\sigma_{f,ELS}$  : Contrainte de dimensionnement à l'ELS du matériau FRP

$\sigma_{f,ELU}$  : Contrainte de dimensionnement à l'ELU du matériau FRP

$\varepsilon_{f,ELS}$  : allongement de dimensionnement à l'ELS du matériau FRP  
 $\varepsilon_{f,ELU}$  : 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  
 $f_{cj}(f_{tj})$  : 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 ( $f_{ed} = \frac{f_e}{\gamma_s}$ )  
 $f_{cd}$  : contrainte de dimensionnement retenue pour le béton ( $f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{\theta \cdot \gamma_b}$ )  
 $f_{fd}$  : Contrainte de dimensionnement retenue pour les tissus  
 $\sigma_{bc}$  : Contrainte dans le béton  
 $\sigma_s$  : Contrainte dans l'acier tendu  
 $\sigma_{sr}$  : Contrainte dans l'acier comprimé  
 $\sigma_f$  : Contrainte dans les fibres  
 $n$  : Coefficient d'équivalence acier/béton ( $n = \frac{E_s}{E_b}$ ) pris égal à 15 (BAELA4.5,1)  
 $n'$  : Coefficient d'équivalence fibres/béton ( $n = \frac{E_f}{E_b}$ )  
 $E_f$  : Module d'élasticité de la fibre utilisée

### **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  
 $M_{pr}$  : 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  
 $M_{Ed0}$  : Moment de dimensionnement admissible de la section non renforcée  
 $M_{Re0}$  : Moment admissible de la section non renforcée (combinaison accidentelle)  
 $n_M$  : Degré de renforcement à la flexion  
 $\gamma_{Me}$  : 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)  
 $\gamma_c$  : Coefficient de sécurité du béton  
 $F_{fd,E}$  : 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  
 $l_{b,max}$  : Longueur d'ancrage correspondant à la force maximale de rupture de l'adhérence  
 $\gamma_b$  : Coefficient de sécurité de la colle époxy  
 $x_E$  : Distance entre le point E et l'axe théorique de l'appui  
 $a_t$  : Distance entre l'axe théorique de l'appui et l'arête du bord de l'appui  
 $f$  : Distance entre l'extrémité du renfort FRP et l'arête du bord de l'appui  
 $a_L$  : Décalage horizontal de la ligne de force de traction selon Lois de comportement et caractéristiques des matériaux FRP

### **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  
 $V_{Rdc}$  : Résistance au cisaillement du béton  
 $V_{Rds}$  : Résistance au cisaillement de l'acier existant  
 $V_{Rd,max}$  : Résistance maximum des bielles de compression  
 $\Delta V$  : Effort tranchant admissible par le renfort de l'effort tranchant  
 $a_{sw}$  : Section de l'armature d'étriers internes  
 $\sigma_{sw}$  : Contrainte des étriers intérieurs  
 $\sigma_{fw,ELU}$  : Allongement de dimensionnement à l'ELU pour le renfort à l'effort tranchant

$t_w$  : Epaisseur 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  
 $\sigma_{fw}$  : 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  
 $\alpha$  : Coefficient pour le chargement à long terme selon EC2  
 $f_s$  : Valeur caractéristique de la résistance de l'acier  
 $\gamma_{cc}$  : Coefficient de sécurité partiel pour la résistance tri-axial du béton  
 $\gamma_s$  : 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  
 $\rho_f$  : Ratio d'armature FRP  
 $\varepsilon_a$  : Déformation axiale du poteau  
 $\varepsilon_l$  : Déformation latérale  
 $\sigma_l$  : Compression effective du confinement

#### 2.4.1.2. Diagnostic préalable

À défaut de documents de récolement permettant de caractériser la géométrie et les matériaux constitutifs de la structure existante, ou en présence de pathologies susceptibles d'avoir altéré les propriétés mécaniques des matériaux, un diagnostic préalable de l'état de la structure à renforcer devra être réalisé avant toute étude d'exécution. Il devra permettre de caractériser les dimensions, les sections, la nature et la résistance des armatures et du béton en présence.

#### 2.4.1.3. Hypothèses de calcul

Les calculs sont menés conformément à l'Eurocode 2 ou au BAEL et BPEL en appliquant les règles mécaniques connues du dimensionnement classique du béton armé. Le calcul au coefficient d'équivalence n'est pas retenu :

- 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 pour le dimensionnement selon les Eurocodes, et par les règlements BAEL et BPEL si le dimensionnement se fait suivant ces règlements

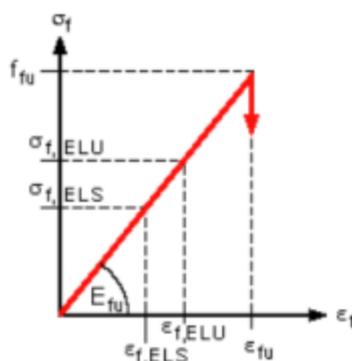
La vérification à l'état limite ultime se base sur une comparaison de la valeur de dimensionnement d'une sollicitation avec la valeur de dimensionnement de la capacité portante de la section selon la condition suivante :

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

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

## 2.4.1.4. Loi de comportement des matériaux

### 2.4.1.4.1. Composites



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

#### 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 considérer pour le dimensionnement.

Tissus S&P C-Sheet 240 en flexion			S&P C-Sheet 240
Allongement à la rupture (valeur moyenne)	$\epsilon_{fu}$	[‰]	15,5
Module d'élasticité (valeur moyenne)	$E_{fu}$	[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, 400 g/m<sup>2</sup>

- Dimensionnement à l'ELS :  $R_{fd,ELS} = 1'200 \text{ MPa} \times 234 \text{ mm}^2 = 280,8 \text{ kN}$
- Dimensionnement à l'ELU :  $R_{fd,ELU} = 1'720 \text{ MPa} \times 234 \text{ mm}^2 = 402,5 \text{ kN}$

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

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

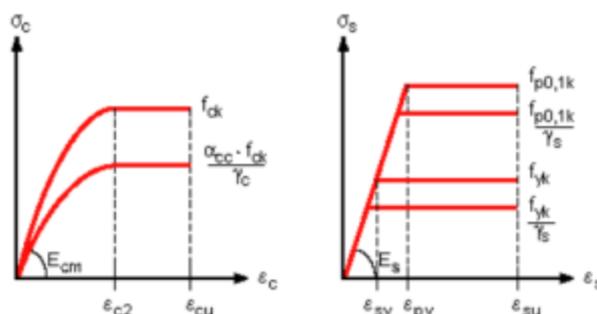
Tissus S&P C-Sheet 240 à l'effort tranchant			S&P C-Sheet 240
Allongement à la rupture (valeur moyenne)	$\epsilon_{fu}$	[ ‰]	15,5
Module d'élasticité (valeur moyenne)	$E_{fu}$	[MPa]	240 000
Contrainte de rupture (valeur moyenne)	$f_{fu}$	[MPa]	3 720
Contrainte de dimensionnement à l'ELU Pour l'utilisation avec ancrages par cornières métallique, limiter la contrainte de dimensionnement $\sigma_{fw,ELU}$ à 800 MPa	$\sigma_{fw,ELU}$	[MPa]	960
Allongement de dimensionnement à l'ELU (Recommandation interne S&P)	$\epsilon_{fw,ELU}$	[‰]	4,00
Allongement de dimensionnement à l'ELU selon l'AFGC 2011		[‰]	7.17

Exemple de dimensionnement pour un tissu C-Sheet 240, 400g/m<sup>2</sup>

- Dimensionnement à l'ELU recommandé :  $R_{fdw,ELU} = 960 \text{ MPa} \times 234 \text{ mm}^2 = 224,6 \text{ kN}$

#### 2.4.1.4.2. Béton et armatures existantes

Les lois de comportements types décrites ci-dessous peuvent être utilisées pour le dimensionnement si le diagnostic de structure le valide :



**Béton Acier d'armature / de précontrainte**

#### 2.4.1.5. Justification à la rupture

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

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

- **(R1) ≥ 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) ≥ 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.

#### 2.4.1.6. Longueur et forces d'ancrage

##### 2.4.1.6.1. Adhérence FRP – Support pour les systèmes FRP

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 FRP et de la résistance à la traction superficielle du support.

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

Avec :

$$\bullet F_{bsd} = \frac{f_{csm}}{\gamma_c} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \text{ et } F_{cd,cube} = \frac{f_{ck,cube}}{\gamma_c} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (3)$$

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

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

$$l_{b,max} = 1,46 \times \sqrt{\frac{E_f \times n_f \times t_f}{\sqrt{f_{csd} \times f_{cd,cube}}}} \quad (mm) \quad (4)$$

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

$$F_{bd} = F_{bd,max} \times \frac{l_b}{l_{b,max}} \times \frac{f_b}{l_{b,max}} \times \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad (N/mm^2) \quad (5)$$

#### 2.4.1.6.2. Vérification du glissement à l'interface composite-béton :

La 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

La contrainte de cisaillement admissible dans le béton, due à l'adhérence du composite, est :

Résine	$\tau_{ad,e}$ [MPa]	$v_{ad}$ [MPa]	$v_{ad,u}$ [MPa]
S&P Resin 55 HP	1,72	0,98	1,10
S&P Resicem HP	1,6	0,91	1,02

- À l'ELS :  $\bar{\tau} \leq \min(v_{ad}; \frac{f_{tk}}{2})$  ;
- À l'ELU et combinaisons accidentelles :  $\bar{\tau}_u \leq \min(v_{ad,u}; \frac{f_{tk}}{1,5})$ .

#### 2.4.2. Dimensionnement des renforcements à la flexion

##### 2.4.2.1. Dimensionnement selon l'Eurocode 2

##### 2.4.2.1.1. Renforcement en flexion du béton armé

###### Principe :

La détermination de la capacité portante flexionnelle de la section non renforcée  $M_{Rd0}$  et de l'état d'allongement initial  $\epsilon_0$  ainsi que le calcul de la section FRP nécessaire  $A_{f,min}$  et de la capacité portante flexionnelle pour l'état renforcé  $M_{Rdf}$  s'effectuent sur la base des conditions d'équilibre  $\Sigma H = 0$  et  $\Sigma M = 0$  en tenant compte des lois des matériaux.

###### Forces internes

Acier  $F_s \leq E_s \times A_s \times \epsilon_s \leq A_s \times \left( \frac{F_{yk}}{\gamma_s} \right) \quad (8)$

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

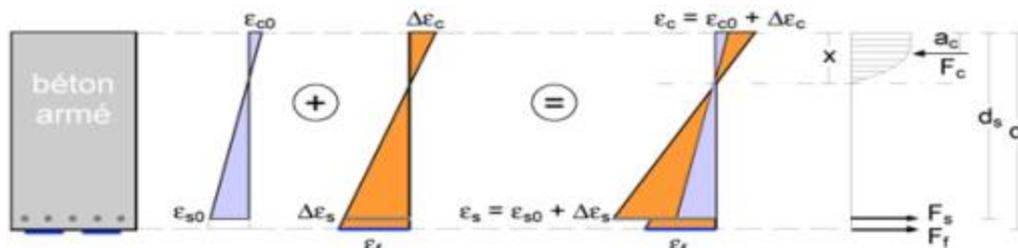
Béton  $F_c \leq b \times \alpha_r \times \left( \frac{F_{ck}}{\gamma_c} \right) \quad (10)$  avec ( $\alpha_r$  : paramètre de la courbe parab.)

###### Conditions d'équilibre

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

$$\Sigma M = 0 \rightarrow F_c \times a_c - F_s \times d_s - F_f \times d_f = 0 \quad (12)$$

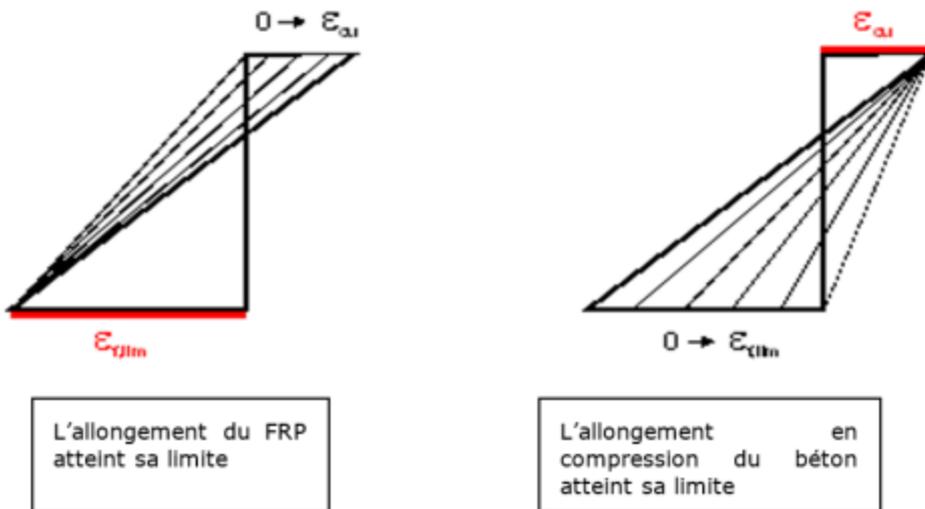
La résolution des conditions d'équilibre s'effectue itérativement en variant les allongements dans la zone comprimée et la zone tendue. Les conditions d'équilibre sont contrôlées en passant les différents états d'allongement.



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

### État limite ultime

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



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

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

$$n_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rdo}} \leq \left(\frac{1}{0,63}\right) \quad (6)$$

- 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) :

$$n_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rdo}} \leq \left(\frac{1}{0,5}\right) \quad (7)$$

### État de service

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

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.

- Contrainte dans l'acier :
  - $\sigma_{slim} = 0,8 \cdot F_{yk}$  Sous combinaison caractéristique.
- Contrainte dans le béton :
  - $\sigma_{slim} = 0,6 \cdot F_{yk}$  Sous combinaison caractéristique
- Contrainte dans le béton :
  - $\sigma_{slim} = 0,45 \cdot F_{yk}$  Sous combinaison quasi-permanente.
- Contrainte dans le composite :
  - $\sigma_{flim} = \min(0,9 \cdot \sigma_{slim}, \sigma_{f,ELS})$  avec  $\sigma_{slim}$  la limite de la contrainte de traction des aciers.

#### 2.4.2.1.2. Renforcement en flexion du 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  $M_{Ek0}$ ,  $M_{Edf}$  et  $M_{Ekf}$ .

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.

## Forces internes

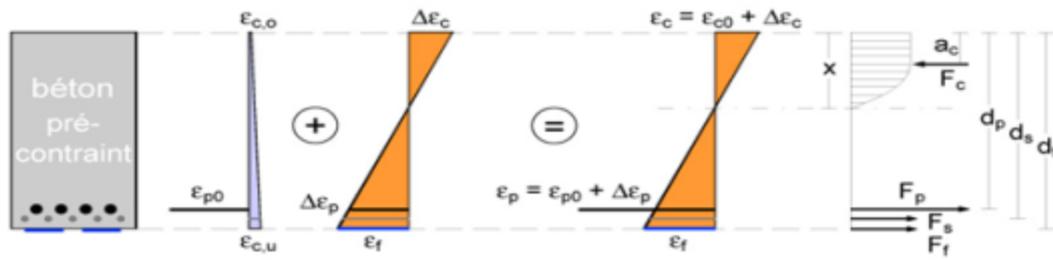
Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique.

### Conditions d'équilibre

Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique en considérant l'effort  $F_p$ .

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

$$\Sigma M = 0 \rightarrow F_c \times a_c - F_s \times d_s - F_p \times d_p - F_f \times d_f = 0$$



### État limite ultime

Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique en considérant les armatures précontraintes.

### État de service

Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique. De plus, Il convient de s'assurer que la section d'enrobage est complètement comprimée sous les combinaisons quasi permanentes.

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

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

## 2.4.2.2. Dimensionnement selon BAEL 91 rev 99

### 2.4.2.2.1. Notations complémentaires utilisées dans cette section

#### Matériaux

$f_{c_j}(f_{t_j})$  : 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 ( $f_{ed} = \frac{f_e}{\gamma_s}$ )

$f_{cd}$  : contrainte de dimensionnement retenue pour le béton ( $f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{\theta \cdot \gamma_b}$ )

$f_{fd}$  : contrainte de dimensionnement retenue pour les tissus

$\sigma_{bc}$  : contrainte dans le béton

$\sigma_s$  : contrainte dans l'acier tendu

$\sigma_s'$  : contrainte dans l'acier comprimé

$\sigma$  : contrainte dans les fibres

$n$  : coefficient d'équivalence acier/béton ( $n = \frac{E_s}{E_b}$ ) pris égal à 15 (BAEL A4.5,1)

$n'$  : coefficient d'équivalence fibres/béton ( $n' = \frac{E_f}{E_b}$ )

$E_f$  : 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

$\tau_u$  : contrainte tangente à l'ELU

#### Calcul BA ELU-ELS

$\gamma_u$  : 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

$\gamma_0$  : 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

$\eta$  : coefficient de fissuration

$B_t$  : aire du béton tendu

$\sigma_{Bt}$  : 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

$\tau$  : contrainte tangente de l'élément calculée à partir de l'épaisseur nette  $B_n$

$\sigma_x$  : contrainte normale de la poutre calculée à partir de la section nette

$\sigma_t$  : contrainte normale transversale calculée à partir de l'épaisseur nette  $B_n$

$F_{tu}$  : effort résistant des armatures de précontraintes transversales

$st'$  : espacement des armatures transversales précontraintes mesurées perpendiculairement à la fibre moyenne

$\alpha'$  : angle des armatures transversales précontraintes avec la fibre moyenne de la poutre

$\beta_u$  : angle des fissures d'effort tranchant avec la fibre moyenne de la poutre ( $\beta_u > 30^\circ$ )

#### 2.4.2.2.2. Renforcement en flexion du béton armé

##### Forces internes

Le paragraphe 2.4.2.1.12.4.2.2.2 s'applique.

##### Conditions d'équilibre

Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique.

##### État limite ultime

Suivant les conditions d'équilibre de la section à renforcer, le dimensionnement de la section de composite à l'ELU sous chargement final est donné ci-dessous :

$$A_f = \frac{M_u - A_s \times f_{ed} \times (z - (h - d)) + A_{s'} \times f_{ed} \times (z - (h - d'))}{z \times f_{td}} \quad (8)$$

avec :

$$z = 0,5 \times h \times (1 + \sqrt{1 - 2 \times \mu_u}) \quad (9)$$

et

$$\mu_u = \frac{M_u + A_s \times f_{ed} \times (h - d) - A_{s'} \times f_{ed} \times (h - d')}{b_0 \times f_{td} \times h^2} \quad (10)$$

##### État de service

Le calcul des contraintes à l'ELS se fait comme suit :

- Dans le béton :  $\sigma_{bc} = \frac{M_s}{I_1} \cdot y_0$  (11)
- Dans l'acier comprimé :  $\sigma_{sc} = n \cdot \frac{M_s}{I_1} \cdot (y_0 - d')$  (12)
- Dans l'acier tendu :  $\sigma_s = n \cdot \frac{M_s}{I_1} \cdot (d - y_0)$  (13)
- Dans les fibres :  $\sigma_f = n' \cdot \frac{(M_s \text{ final} - M_s \text{ initial})}{I_1} \cdot (h - y_0)$  (14)

Avec :

$$I_1 = \frac{b_0}{3} \cdot y_0^3 + n \cdot A_s \cdot (d - y_0)^2 + n \cdot A_{s'} \cdot (d' - y_0)^2 + n \cdot A_f \cdot (h - y_0)^2 \quad (15)$$

Les contraintes totales (superposition de l'état initial et de l'incrément de surcharge après renforcement) sont comparées aux contraintes admissibles données dans le BAEL :

- Dans le béton :  $\sigma_{bcTOT} = \sigma_{bc} + \Delta\sigma_{bc} \leq 0,6 \times f_{c28}$  (16)
- Dans l'acier comprimé :  $\sigma_{scTOT} = \sigma_{sc} + \Delta\sigma_{sc} \leq \bar{\sigma}_s$  (17)
- Dans l'acier tendu :  $\sigma_{sTOT} = \sigma_s + \Delta\sigma_s \leq \bar{\sigma}_s$  (18)
- Dans la fibre :  $\sigma_f \leq \sigma_{f \text{ lim}} = \min \{ \sigma_{f, d}; 450 \text{ MPa} \}$  (19)

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

- En fissuration peu préjudiciable,  $\bar{\sigma}_s = f_e$  (20)
- En fissuration préjudiciable et très préjudiciable, se référer respectivement aux paragraphes BAEL A.4.5,33 et A.4.5,34

#### 2.4.2.2.3. Renforcement en flexion du béton précontraint

##### Forces internes

Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique.

##### Conditions d'équilibre

Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique en considérant l'effort  $F_p$ .

##### État limite ultime

Le paragraphe 2.4.2.1.1 s'applique en considérant les armatures précontraintes.

## État de service

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.

### Classe 1 :

Le recours à la classe 1 pour le dimensionnement des ouvrages est en principe exceptionnel. Elle ne tolère aucune traction du béton sous combinaison rare. Cette classe est usuellement réservée aux éléments en traction simple en environnement très agressif. Le basculement de ces structures en Classe 2 pour la faisabilité de leur renforcement est à apprécier au cas par cas.

### Classe 2 :

La vérification en classe 2 s'applique en général aux ouvrages initialement calculés en classe 2, dont on souhaite augmenter la capacité portante. Les contraintes sont calculées sur la section non fissurée.

Au moment du renforcement, aucune traction n'est admise dans le béton.

En service, les contraintes de traction dans le béton sont calculées en vérifiant les valeurs données dans le BPEL (art. 6.1,23) :

- 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

### Classe 3 :

Le calcul est effectué en section fissurée (calcul en flexion composée en considérant l'historique du renforcement).

Dans tous les cas, sous combinaison quasi permanente, aucune contrainte de traction n'est admise dans la section d'enrobage. On peut néanmoins accepter une tension inférieure ou égale  $0,7 \times f_{tj}$  si une imperméabilisation selon la NF EN 1062 est disposée en sur la zone en question.

## Contraintes normales admissibles dans les matériaux :

- Contrainte de compression admissible dans le béton (toutes les classes) :  $0,6 \times f_{cj}$  sous combinaison rare (ou  $0,5 \times f_{cj}$  sous combinaison quasi permanente)
- Pour les aciers passifs (classe 3) :
  - En combinaison rare  $\min\{\frac{2}{3} \times f_e; \max(0,5f_e; 110 \times \sqrt{\eta \times f_{tj}})\}$ ; (21)
  - En combinaison fréquente :  $0,35 \times f_e$  (concerne uniquement la surtension des armatures)
- Pour les aciers de précontraintes (classe 3) :
  - En combinaison rare, la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à :
  - $0,1 \times f_{prg}$  pour la post tension
  - $\min\{0,1 \times f_{prg}; 150 \times \eta_p\}$  pour la prétension
  - En combinaison fréquente : la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à 100 MPa
- Pour les fibres de carbone :  $\sigma_f$

### Aciers minimums :

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

$$A_{s\min} = \frac{B_t}{1000} + \frac{N_{Bt}}{\sigma_{Bt}} \times \frac{f_{tj}}{f_e} \quad (22)$$

En cas de non-satisfaction à cette condition, il convient de vérifier que la section de de renfort FRP permet de satisfaire :

$$A_f = \frac{(A_{s\min} - A_{s\text{réel}})f_e}{f_{fd}} \geq 0 \quad (23)$$

$A_{s\min}$  est la section minimale d'armatures requises, en application de l'article 6.1,32 des règles BPEL ;

$A_{s\text{réel}}$  est la section d'armatures réellement en place.

### 2.4.2.3. Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP

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

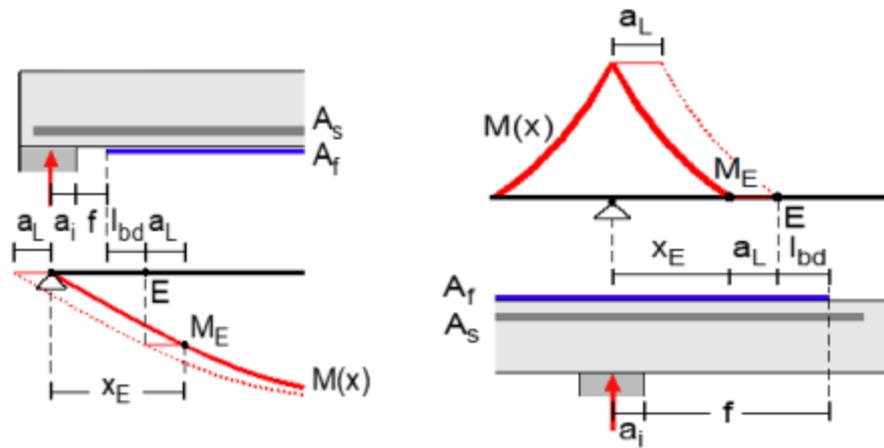
$$\text{Poutres } F_{bd} \geq F_{fd} \quad (24)$$

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

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

$$X_E \leq a_i + f + l_{bd} + a_i \quad (25)$$

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



#### 2.4.2.4. Vérification de la contrainte d'entraînement

La contrainte d'entraînement  $\tau_m$  à l'interface composite-béton doit être inférieure aux contrainte admissible  $\tau_{m, lim}$  (cf. paragraphe 2.4.1.6.2).

$$\tau_m = \frac{F_f}{F_s + F_f} \cdot \frac{V_{Ed}}{b_f z} \quad (26)$$

Avec :

- $V_{Ed}$  valeur de l'effort tranchant sollicitant à la section vérifiée ;
- $F_f$  et  $F_s$  forces respectives dans le composite et les armatures longitudinales, à la section vérifiée ;
- $Z$  Bras de levier interne entre l'effort de compression et les efforts de traction des armatures (aciers longitudinaux et composite).

#### 2.4.3. Dimensionnement des renforcements à l'effort tranchant

##### 2.4.3.1. Principe

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

- $V_{Edf} \leq V_{Rd,c}$  (27)

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.

- $V_{Edf} \leq V_{Rd,s}$  (28)

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.

- $V_{Edf} > V_{Rd,s}$  (29)

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 :

$$\Delta V = V_{Edf} - V_{Rd,s} \quad (30)$$

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 décrit ci-dessous au paragraphe 2.6.4. Si le dimensionnement le justifie, il est possible renforcer la poutre à l'effort tranchant en mettant le tissu uniquement sur la retombée de la poutre.

##### 2.4.3.2. Dimensionnement selon l'Eurocode 2

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

$$a_{w,min} = \Delta V / (z_f \sigma_{fw}) \quad \text{avec} \quad \sigma_{fw} = \varepsilon_{fw,ELU} E_{fu} \quad (31)$$

Avec :

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

$$s_{w,max} = 0,8 h \quad (32)$$

##### 2.4.3.3. Dimensionnement selon le BAEL

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.

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_0 \times d} \quad (33)$$

$$V_u = V_{u,acier} + V_{u,béton} + V_{u,fibres} \quad (34)$$

$$V_{u,béton} = 0,3 \times k \times f_{tj} \times b_0 \times d \quad (35)$$

$$V_{u,acier} = \frac{A_s}{s_t} \times 0,9 \times d \times \sigma_{sd} \times (\cot \beta + \cot \alpha) \times \sin \beta \quad (36)$$

$$V_{u,fibres} = \frac{A_f}{s_f} \times z \times f_{fd} \times (\cot \beta + \cot \alpha) \times \sin \beta \quad (37)$$

**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.

- $z = h_{retombée} - l_{collage}$  si retour horizontal
- $z = h_{retombée} - 2 \times l_{collage}$  sinon  $l_{collage} = 100 \text{ mm}$
- $A_f = 2 \times t_f \times b_f$

**2.4.3.4. Ancrage des tissus**

L'ancrage des tissus 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.



L'ancrage des tissus peut également être réalisé à l'aide des mèches d'ancrage S&P C-Anchor (voir chapitre 2.4.5.3) ou pièces d'ancrage métalliques (voir chapitre 2.4.5.2) comme représenté ci-dessous.



Ancrage par mèches

Ancrage par dispositif métallique

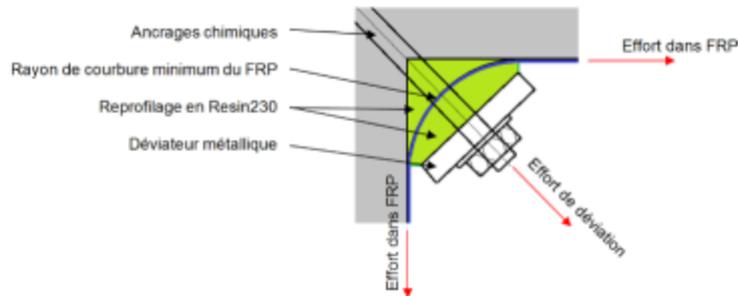
Les pièces d'ancrage métalliques sont collées sur le tissu avec une longueur de recouvrement de 10 cm et boulonnées dans la dalle et dans l'âme de la poutre pour éviter la rotation, le cas échéant. Voir Annexe 5.

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

#### 2.4.3.5. Reprise des efforts de déviation

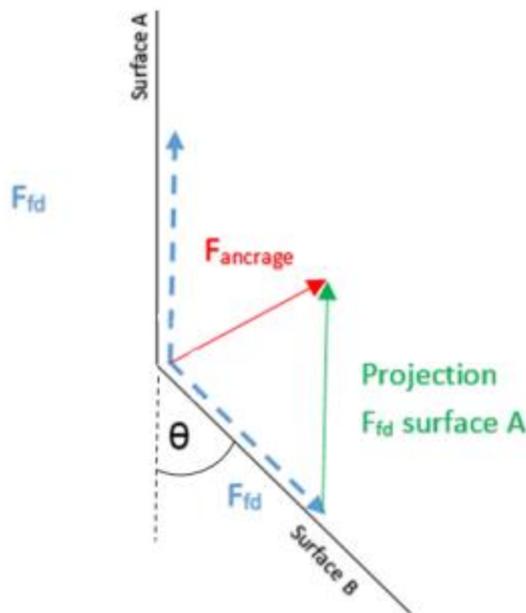
Lorsque la mise en œuvre du système S&P C-Sheet induit une poussée au vide, la zone de déviation doit être munie d'un dispositif reprenant ces efforts. Le système pour reprendre la poussée au vide peut être composé d'une pièce métallique ancrée dans le béton par des ancrages chimiques type S&P ResAC-19 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.

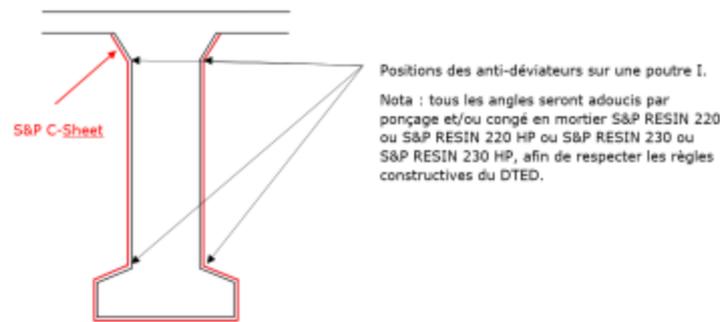


On a alors :

$$R_{\text{ancrage}} \leq F_{\text{ancrage}} = 2 \times F_{fd} \times \sin \frac{\theta}{2}$$

Avec :

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



Pour certains cas particuliers, la reprise des efforts de déviation peut être traitée selon le guide méthodologique du CEREMA « Évaluation structurale et réparation des Viaducs à travées Indépendantes à Poutres Préfabriquées précontraintes par post-tension (VIPP) »

### 2.4.4. Dimensionnement des renforcements des poteaux en béton

#### 2.4.4.1. 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 FRP 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.

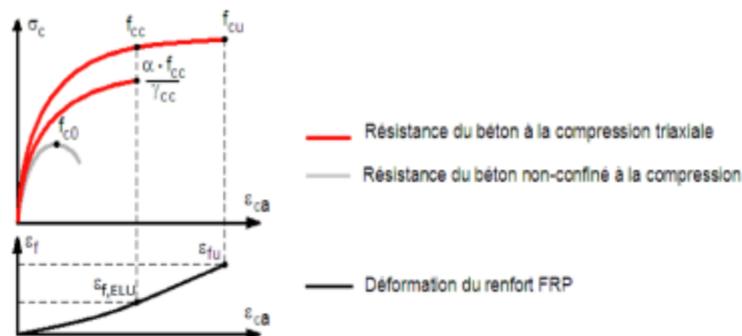
La compression effective induit par le confinement est déterminée comme suit :

$$\sigma_l = \rho_f \cdot k_e \cdot E_{fd} \cdot \varepsilon_l \text{ avec } \varepsilon_l = \varepsilon_{f,ELU} \quad (38)$$

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

$$f_{cc} = f_{co} \cdot \left( 2,254 \cdot \sqrt{1 + 7,94 \cdot \frac{\sigma_l}{f_{co}}} - 2 \cdot \frac{\sigma_l}{f_{co}} - 1,254 \right) \cdot \left( 1,4 \cdot \frac{h}{b} - 0,6 \cdot \left( \frac{h}{b} \right)^2 - 0,8 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_l}{f_{co}}} + 1 \right) \quad (39)$$

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/mm<sup>2</sup> entre les couches du tissu qui se recouvrent.

#### 2.4.4.2. 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 :

$$\varepsilon_{f,ELU} = 4,0 \text{ [‰]} \quad (40)$$

La capacité portante du poteau renforcé est déterminée comme suit :

$$N_{Rdf} = (A_g - A_s) \times \frac{\alpha \cdot f_{cc, fib}}{\gamma_{cc}} + A_s \times \frac{f_s}{\gamma_s} \quad (41)$$

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

### 2.4.4.3. 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 :

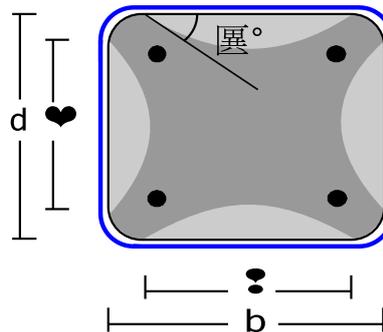
$$\rho_f = \frac{2 \times t_f}{D} \quad (42)$$

### 2.4.4.4. 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  $k_e$  :

$$k_e = 1 - \frac{b r^2 + d r^2}{3 A_g (1 - A_s / A_g)} \quad (43)$$

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



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

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

$$\text{Et } \rho_f = \max(\rho_{fx}; \rho_{fy}) \quad (44)$$

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

## 2.4.5. Dimensionnement des dispositifs d'ancrage

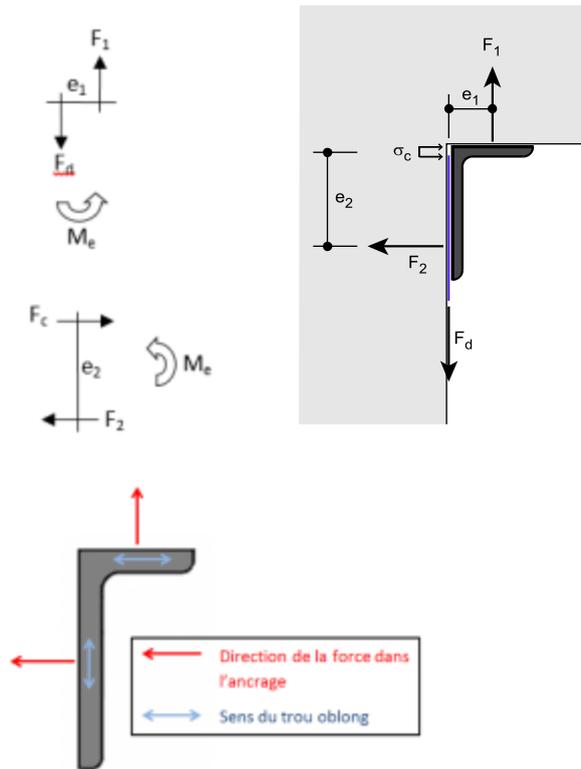
### 2.4.5.1. Principe

Des dispositifs peuvent s'avérer nécessaire pour ancrer les tissus S&P C-Sheet lorsque les longueurs d'ancrages  $l_b$  ou  $l_{b,max}$  (paragraphe 2.4.1.6.1) ne permettent pas d'assurer une force d'ancrage suffisante. L'ancrage du renforcement pourra alors être assuré par dispositif métallique ou par mèches d'ancrage S&P C-Anchor.

Le dimensionnement des éléments d'ancrage est réalisé à partir des efforts de calcul ELU déterminés lors du dimensionnement (Eurocode 2 ou BAEL/BPEL) en fonction des efforts sollicitant au droit de la section concernée par cette justification.

### 2.4.5.2. Ancrage par dispositif métallique

La figure ci-dessous explicite les forces et paramètres entrant en jeu dans le dimensionnement des dispositifs d'ancrage métalliques.



$$F_1 = Fd$$

$$M_e = F_d \times e_1$$

Avec

$F_d$  Effort du tissu ;

$F_1, F_2$  Effort des chevilles ou des tiges filetées ;

$F_c, \sigma_c$  Compression du béton ;

$M_e$  Moment d'excentricité.

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 :

$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$

$f_{yk}$  Limite élastique caractéristique nominale de l'acier ;

$W_{sy}$  Moment résistant de la cornière ;

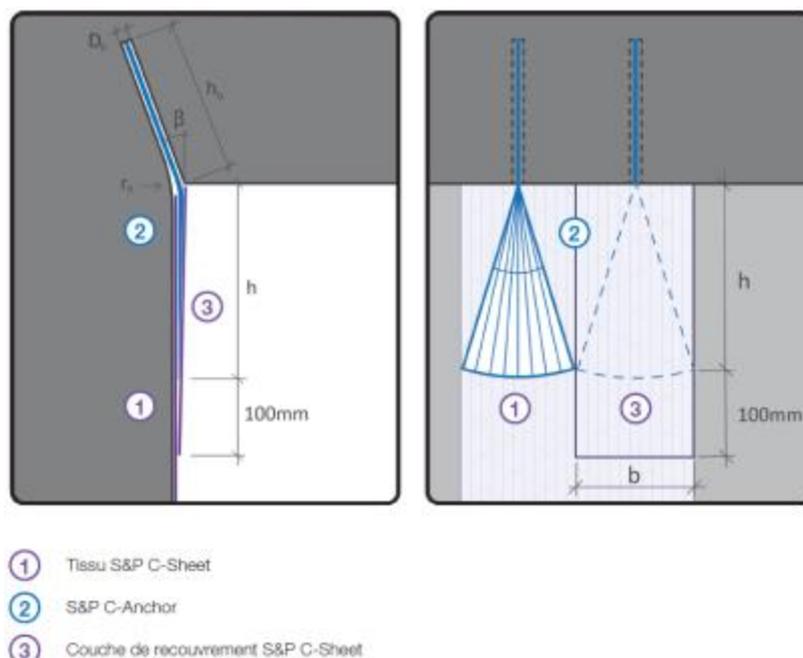
$A_s$  Section de la cornière  $A_s = b_s \times t$  ;

$b_s$  Longueur de la cornière ;

$t$  épaisseur de la cornière.

Dans le cas de l'utilisation de dispositifs d'ancrage métalliques, l'allongement maximal du tissu à l'ELU sera limité à  $\epsilon_{fw,ELU} \leq 4\%$  et la contrainte de dimensionnement  $\sigma_{fw,ELU} \leq 800 \text{ MPa}$  conformément au §2.4.1.4.1.

### 2.4.5.3. Ancrage par mèches



Où :

- $D_0$  : Diamètre du trou
- $h_0$  : Profondeur
- $\beta_0$  : Angle du trou par rapport au tissu S&P C-Sheet
- $r_0$  : Rayon minimal dans la zone de transition entre la partie pultrudée et la partie en éventail de l'ancrage ( $r_0 \geq 25$  mm)
- $h$  : Longueur de la partie déployée en éventail (2) en contact avec le S&P C-Sheet qui doit être ancré (1).
- $b$  : Largeur requise de la partie en éventail du S&P C-Anchor (2) et largeur de la couche de recouvrement par S&P C-Sheet (3).

### Caractéristiques de dimensionnement

Le tableau ci-dessous contient les valeurs caractéristiques et de dimensionnement en fonction de la qualité du béton et de la configuration de mise en œuvre d'un S&P C-Anchor (voir figure ci-dessus) :

$D_0$ (mm)	$h_0$ (mm)	$\beta_0$ (°)	$r_0$ (mm)	$h$ (mm)	$b$ (mm)	Recouvrement	Qualité minimale du béton	$F_k$ (kN)	$\gamma_F$	$F_d$ (kN)
14	200	20 à 30	$\geq 25$ mm	250	150	Oui	C20/25	65	1,4	46,4
					100					

### 2.4.6. Règles constructives

- Distance au bord :  $a_{r,min} = c_w$  (1)
- Entraxe en fonction de la portée  $s_{f,max} = 0,2 \cdot l$  (2)
- Entraxe en fonction du porte-à-faux  $s_{f,max} = 0,4 \cdot l$  (3)
- Entraxe en fonction de l'ép. de la dalle  $s_{f,max} = 5 \cdot h$  (4)
- Nombre de couches de S&P C-Sheet  $n_{f,max} = 5$  (5)
- 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,  $0,8 \times h$ .

Si un élément structural 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.

## 2.5. Dispositions de mise en œuvre

Avant le démarrage de la mise en œuvre des renforts, l'entreprise applicatrice doit vérifier qu'elle dispose du plan de pose concerné.

Des guides d'applications sont disponibles sur le site internet de S&P Reinforcement France [www.sp-reinforcement.fr](http://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 théorique et pratique de S&P Reinforcement France.

### 2.5.1. Préparation et contrôles préliminaires

#### 2.5.1.1. Détermination de la résistance à l'arrachement du support

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

La valeur minimale de résistance caractéristique à la traction du support  $f_{tk}$  selon NF EN 1542 pour les tissus S&P C-Sheet est :  $> 1.5 \text{ N/mm}^2$ .

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

#### 2.5.1.2. 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 TECNOGROUT-FIB ou S&P TECNOGROUT-K ou S&P Resin 230 ou S&P Resin 230 HP ou S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP ou des mortiers de réparation conforme à la norme NF EN 1504-3 et garantissant des valeurs mécaniques conformes aux minimas demandés dans ce document.

Le système ne doit pas être collé sur des supports irréguliers, ce qui pourrait entraîner des poussées au vide indésirables. En l'absence de règles gérant ces irrégularités en France, les limites de planéité suivantes devront être respectées :

- Irrégularité concave : le passage d'une règle métallique de 2 mètres de longueur ne doit laisser subsister aucune inégalité de plus de 5 mm. Des inégalités  $< 1 \text{ mm}$  sont admissibles sous une règle de 30 cm.
- Irrégularité convexe : Les irrégularités convexes n'entraînent pas de poussée au vide. Elles n'ont donc pas besoin d'être traitées.

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

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

#### 2.5.1.3. Point particulier de préparation de support

Les angles et arrêtes (renfort au cisaillement des poutres ; enrobage de poteaux de section carré ou rectangulaire) seront arrondies avec un rayon minimum de 2,5 cm.

#### 2.5.1.4. Détermination du point de rosée

Pour déterminer la température du point de rosée, il convient de mesurer l'humidité relative de l'air ainsi que la température de l'air. Pour évaluer le risque de formation d'eau de condensation, la température du point de rosée sera comparée à la température superficielle de l'élément de construction, celle-ci devant être au moins de 3 °C supérieure à la température du point de rosée (cf. tableau des points de rosée, Annexe 4).

#### 2.5.1.5. Humidité du support en béton

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

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

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

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

#### **Humidité maximale du support en fonction des produits de collage.**

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

### 2.5.1.6. Préparation mécanique du support

La préparation mécanique peut se faire par sablage, grenailage, fraisage ou par ponçage pour les petites surfaces (collage des tissus S&P C-Sheet par exemple), ou tout autre préparation assurant les caractéristiques minimums requises pour l'adhérence. Un hydro sablage ou hydro décapage peut également convenir, mais dans ce cas un temps de séchage doit être observé avant la pose du tissu pour revenir à un taux d'humidité inférieur au maximum autorisé.

Avant collage, le support doit être parfaitement dépoussiéré.

### 2.5.2. Mise en œuvre du procédé

#### 2.5.2.1. Mélange de la colle S&P Resin 55 HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

Produit	D.P.U. à 21° C	Humidité du support	Température d'application
S&P Resin 55 HP	~ 45 min.	< 4 %	+8 °C à +35 °C

#### 2.5.2.2. Mélange de la colle S&P Resicem HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

Produit	D.P.U. à 21° C	Humidité du support	Température d'application
S&P Resicem HP	~ 45 min.	< 10 %	+8 °C à +35 °C

#### 2.5.2.3. Application des tissus S&P C-Sheet

##### Méthode 1 – Application par voie sèche :

Sur le support, la S&P Resicem HP / 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 plastique de protection est enlevée du tissu. Le S&P C-Sheet est marouflé avec une spatule en caoutchouc dur et un rouleau lamineur en téflon spécial dans la résine S&P. Le rouleau lamineur 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 HP / 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 HP / 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 au préalable est déroulé et maroufflé avec une spatule en caoutchouc dur et un rouleau lamineur en téflon spécial.

Le rouleau lamineur en téflon ou la spatule sont tirés exclusivement dans le sens des fibres jusqu'à ce que toutes les fibres soient parfaitement tendues sur le support. Visuellement aucune inclusion d'air ne doit être présente.

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

#### 2.5.2.4. Mise en œuvre des mèches

Les mèches d'ancrage S&P C-Anchor devront être posées conformément au guide de pose S&P « Instructions d'application ». La connaissance de ce guide ne dispense pas d'une formation à la pose délivrée par un spécialiste S&P France.

La partie en fibre sèches sera imprégnée de résine S&P sur site avant application. La résine utilisée pour la stratification de la partie en fibre sèche des mèches doit être identique à la résine utilisée pour stratifier le tissu S&P C-Sheet servant au renforcement de la structure. Une saturation complète des fibres doit être obtenue.

Seule la résine S&P Resin 55 HP est autorisée pour la stratification de la mèche.

La partie pré durcie des mèches sera ensuite insérée dans le perçage dépoussiéré, préalablement nettoyée, et scellée à la résine ResEp-16.

Les fibres imprégnées seront ensuite appliquées sur le tissu S&P C-Sheet, et patch de recouvrement de tissus S&P C-Sheet sera ensuite appliquée en fermeture du système. La partie flexible en éventail du S&P C-Anchor doit être appliquée frais sur frais sur le tissu S&P C-Sheet et les fibres de carbone doivent être étalées uniformément. Le mouvement de stratification doit se faire à partir du perçage et dans la direction des fibres.

La mise en œuvre devra respecter les caractéristiques décrites dans le paragraphe 2.4.5.3. L'angle d'ancrage varie entre 20° et 30° et l'épanouissement du fouet est de 100 ou 150mm.

#### 2.5.2.5. Contrôles qualité après la pose

##### **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.

##### **Planéité des éléments S&P C-Sheet collés**

La planéité du S&P C-Sheet sera contrôlée immédiatement après l'application. Les règles du paragraphe 2.11.2 s'appliqueront.

##### **Contrôle des vides entre la colle et le support**

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

### **2.5.3. Revêtement des éléments de renfort**

#### 2.5.3.1. Revêtements de protection

Dans tous les cas, les revêtements de protection éventuels 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...

#### 2.5.3.2. Protection au feu

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

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

#### 2.5.3.3. Protection à la température (en service)

Le procédé de renfort C-Sheet admet des températures au niveau du collage en service continu et en pointe telles qu'indiquées au paragraphe 2.2.2.3.4.

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

---

## **2.6. Assistance technique**

Le dimensionnement du renforcement doit être réalisé par un bureau d'études de structure spécialisé en renforcement de structures.

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

S&P Reinforcement assure l'assistance technique pour les entreprises applicatrices de ces systèmes de renforcement. Celles-ci devront avoir été formées à la pose par du personnel S&P avant le démarrage des travaux.

---

## **2.7. Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication**

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

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

La fabrication des éléments constitutifs du procédé C-Sheet fait l'objet d'un suivi de production 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.

## 2.8. Mention des justifications

### 2.8.1. 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, LMC<sup>2</sup>, année 2024 ;
- Essai de cisaillement interlaminaire, LMC<sup>2</sup>, année 2018.
- SST5407-23 S&P Carbon-Anchor Performance test, The Andris Peterson EU Test Laboratory, année 2024
- SST5593-24 S&P Carbon-Anchor Performance test, The Andris Peterson EU Test Laboratory, année 2024
- SST5630-24 Capacity of the C-Anchor in concrete at 30 degrees, The Andris Peterson EU Test Laboratory, année 2024

### 2.8.2. Références chantiers

Centre Commercial Le Merlan, Marseille (C-Sheet 240)	2018
Centre Commercial Casino, Le Cannet (C-Sheet 240)	2018
Centre Commercial Leclerc, Clichy (C-Sheet 240)	2018
Palace center, Mandelieu (C-Sheet 240)	2018
CHU, Limoges (C-Sheet 240)	2018
Gare SNCF, L'Etang La Ville (C-Sheet 240)	2018
Cimenterie Lafarge, Bouc Bel Air (C-Sheet 240)	2018
Parvis des Halles, La Roche Yon (C-Sheet 240)	2021
Planétarium de Douai, Douai (C-Sheet 240)	2022
Groupe scolaire Eugène Pottier, Saint-Jacques de la landes (C-Sheet 240 + ancrage métallique)	2022
Le LUMIERE, Paris 12 (C-Sheet 240)	2023
Hôpital Bauréal, Lyon (C-Sheet 240)	2024
ECLA, Archamps (C-Sheet 240)	2024
Université de Créteil, Créteil (C-Sheet 240)	2024
Galleries Lafayette, Oloron-Sainte-Marie (C-Sheet 240 + C-Anchor)	2024
Projet Chemin Vert, Paris (C-Sheet 240 + C-Anchor)	2024
Parking Metpark, Bordeaux (C-Sheet 240 + C-Anchor)	2024
Bercy Lumière, Paris (C-Sheet 240 + C-Anchor)	2025

**Annexe 1 : caractéristiques mécaniques du composite :**

**Tableau A1-1 : Caractéristiques du composite à la flexion**

Tissus S&P C-Sheet 240 en flexion			S&P C-Sheet 240
Allongement à la rupture (valeur moyenne)	$\epsilon_{fu}$	[‰]	15,5
Module d'élasticité (valeur moyenne)	$E_{fu}$	[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

**Tableau A1-2 : Caractéristiques du composite à l'effort tranchant**

Tissus S&P C-Sheet 240 à l'effort tranchant			S&P C-Sheet 240
Allongement à la rupture (valeur moyenne)	$\epsilon_{fu}$	[ ‰]	15,5
Module d'élasticité (valeur moyenne)	$E_{fu}$	[MPa]	240 000
Contrainte de rupture (valeur moyenne)	$f_{fu}$	[MPa]	3 720
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
Allongement de dimensionnement à l'ELU (Recommandation interne S&P)	$\epsilon_{fw,ELU}$	[‰]	4,00
Allongement de dimensionnement à l'ELU selon l'AFGC 2011		[‰]	7.17

**Tableau A1-3 : Caractéristiques des C-Anchors**

$D_0$ (mm)	$h_0$ (mm)	$\beta_0$ (°)	$r_0$ (mm)	$h$ (mm)	$b$ (mm)	Recouvrement	Qualité minimale du béton	$F_k$ (kN)	$\gamma_F$	$F_d$ (kN)
14	200	20 à 30	$\geq 25$ mm	250	150	Oui	C20/25	65	1,4	46,4
					100					

**Annexe 2 : Essais d'adhérence suivant NF EN 1542**

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

Elément : ..... Colle : ..... Préconditionnement : ..... Diamètre des rondelles : <b>50 mm</b>	Collé le : ..... Température : ..... °C de l'élément Surface d'adhérence A <sub>o</sub> : <b>1962.5 mm<sup>2</sup></b>
---	--

**Appareil d'essai d'adhérence:** .....

Eprouvette	Effort de traction	Résistance d'adhérence	Croquis de rupture	B:	Béton
No.	F [kN]	f [N/mm <sup>2</sup> ]		C:	Colle
				FRP:	S&P 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 3 : 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:  $8^{\circ} < t^{\circ} < 30^{\circ}\text{C}$

>3° au delà de la température du point de rosée

Humidité du béton: < 4 %

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

Date/horaire:					
Température ambiante:					
Température des tissus:					
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 tissus:					
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 :

## Annexe 4 : Tableau des points de rosée

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

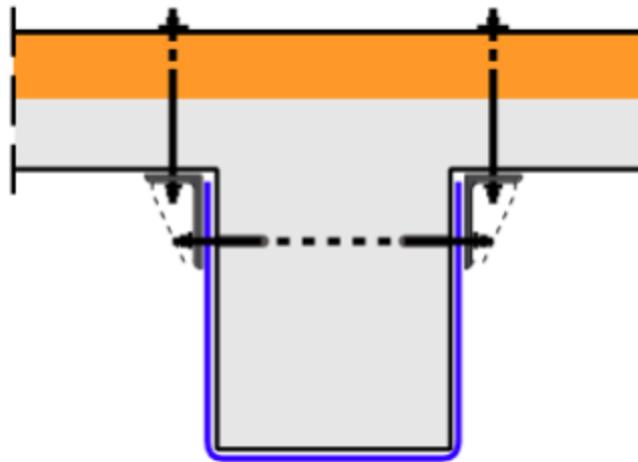
Le tableau indique, en fonction de la température de l'air et de l'humidité de l'air relative, à quelles températures de surface une condensation apparaît. Ainsi, p. ex. une température de l'air de 20 °C et d'une humidité de l'air relative de 70 %, une condensation apparaîtra sur des surfaces non absorbantes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

**Annexe 5 - Ancrages métalliques**

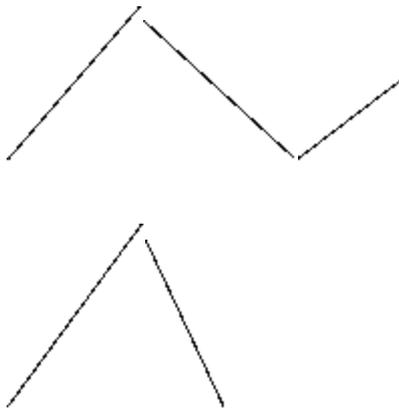
**A-Principe de construction**

**COUPE TYPE**

Tiges filetées traversantes ou ancrée dans la table de compression



Zone comprimée du béton



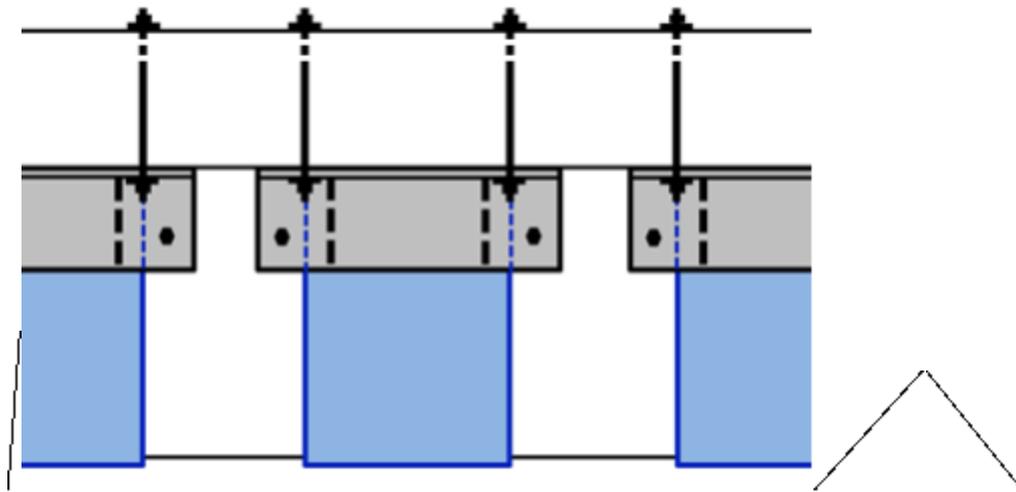
Cornière en acier avec ou sans raidisseurs

Chevilles chimiques ou tiges filetées traversant la poutre en béton en fonction de l'effort

S&P C-Sheet 240

**VUE LATÉRALE**

Tiges filetées traversantes ou ancrée dans la table de compression



Cornière en acier  
avec ou sans raidisseurs  
en fonction de l'effort

Cheilles chimiques ou tiges  
filetées traversant la poutre en  
béton en fonction de l'effort

C-Sheet 240