

Sur le procédé

V2C+Tissu

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

Titulaire(s) : **Société Bouygues Travaux Publics Régions France**

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

Versions du document

Version	Description	Rapporteur	Président
V1	<p>Il s'agit de la révision de l'Avis Technique 3/15-811. Cette version, examinée le 17 octobre 2024 par le Groupe Spécialisé n3.3, intègre les modifications suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séparation du procédé V2C+ en deux procédés distincts : procédés V2C+ Lamelles et V2C+ Tissus. • Ajout de l'utilisation des résines S&P Resin 55, S&P Resin 55 HP, S&P Resicem et S&P Resicem HP 	PAYET Loïc	BERNARDIN-EZRAN Roseline

Descripteur :

Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller sur la surface des éléments visés un tissu de fibres de carbone à l'aide d'une résine époxydique synthétique à deux composants. Ce procédé est destiné à augmenter et renforcer la capacité portante des poutres, dalles, poteaux, sur des ouvrages en béton armé, béton précontraint, par fonctionnement mécanique conjoint élément-renfort, grâce à l'adhérence conférée par la résine après son durcissement, entre les deux matériaux.

Table des matières

1.	Avis du Groupe Spécialisé	4
1.1.	Domaine d'emploi accepté	4
1.1.1.	Zone géographique	4
1.1.2.	Ouvrages visés	4
1.2.	Appréciation	4
1.2.1.	Aptitude à l'emploi du procédé	4
1.2.2.	Durabilité	5
1.2.3.	Impacts environnementaux	5
1.3.	Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé	5
2.	Dossier Technique	7
2.1.	Mode de commercialisation	7
2.1.1.	Coordonnées	7
2.1.2.	Identification	7
2.2.	Description	7
2.2.1.	Principe	7
2.2.2.	Caractéristiques des composants	7
2.3.	Disposition de conception	10
2.3.1.	Dispositions générales	10
2.3.2.	Renforcement au moment fléchissant des éléments en béton armé (Eurocode 2)	15
2.3.3.	Renforcement à l'effort tranchant des éléments en béton armé (Eurocode 2)	18
2.3.4.	Renforcement au moment fléchissant des éléments en béton précontraint (Eurocode 2 ou BPEL 91 rev 99) ...	22
2.3.5.	Reprise des efforts de déviation	23
2.4.	Dispositions de mise en œuvre	24
2.4.1.	Réception et stockage des tissus et résines au dépôt et sur chantier	24
2.4.2.	Condition d'application	24
2.4.3.	Application des tissus	25
2.4.4.	Revêtement de protection	25
2.4.5.	Contrôle de mise en œuvre	25
2.5.	Assistance technique	26
2.6.	Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication	26
2.6.1.	Tissus	26
2.6.2.	Résines	26
2.6.3.	Suivi de fabrication par organisme externe	26
2.7.	Mention des justificatifs	26
2.7.1.	Résultats expérimentaux	26
2.7.2.	Références chantiers	26
2.8.	Annexes du Dossier Technique	27

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 et DROM-COM.

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 ou précontraint entrant dans la constitution des bâtiments courants (habitations, bureaux, etc.) et des bâtiments industriels (supermarchés, entrepôts, etc.).

Les éléments renforcés par le procédé sont en béton armé ou précontraint.

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

L'utilisation 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 « V2C+ Tissus » n'est utilisé que pour le renforcement en flexion et à l'effort tranchant. 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.

L'utilisation du procédé dans des bâtiments nécessitant des dispositions parasismiques au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié, n'est pas visée.

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), sortent du champ du présent Avis.

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

- 50°C en pointe et 40°C en service continu pour la résine S3DT ;
- 58,5°C en pointe et 45,5°C en service continu pour la résine S4DT ;
- 67,5 °C en pointe et 52,5°C en service continu pour la résine S5T ;
- 39,6 °C en pointe et 30,8°C en service continu pour la résine S&P Resin 55 ;
- 48,2 °C en pointe et 37,5°C en service continu pour la résine S&P Resin 55 HP ;
- 39,6 °C en pointe et 30,8°C en service continu pour la résine S&P Resicem ;
- 48,7 °C en pointe et 37,9°C en service continu pour la résine S&P Resicem HP.

L'Avis est émis en prenant en compte le fait que la mise en œuvre est systématiquement assurée par le titulaire.

Le procédé « VC2+ Tissus » peut être associé au procédé « V2C+ Lamelles » qui fait l'objet d'un Avis Technique 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 Dossier Technique et de réaliser les vérifications suivantes :

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 procédé V2C+ Tissus sont non-classés.

1.2.1.2.2. Résistance au feu

En ce qui concerne la résistance au feu, le procédé V2C+ Tissus ne participe pas à la tenue des éléments renforcés. Lorsqu'une protection au feu est prévue par-dessus le composite, elle devra justifier d'un essai de résistance au feu, effectué sur un support identique, par un Laboratoire agréé par le ministère de l'Intérieur. L'attention est attirée sur le fait que les caractéristiques mécaniques de la colle diminuent rapidement lorsque la température augmente.

1.2.1.3. Prévention des accidents lors de la mise en œuvre ou de l'entretien

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 au paragraphe 1.1.2, cet Avis ne vise pas les utilisations en locaux (ou ambiances) suivants :

- Atmosphère agressive ;
- 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 1.1.2 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 V2C+ Tissus ne dispose d'aucune Déclaration Environnementale (DE) et ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière. Il est rappelé que les DE n'entrent pas dans le champ d'examen d'aptitude à l'emploi du procédé.

1.3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

Le Groupe Spécialisé n°3.3 a fixé au §1.1.2 des limites de température en service continu en fonction de la résine utilisée pour la stratification des renforcements. Ces valeurs ont été définies en fonction de la température de transition vitreuse des résines. 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 ou de renforts complémentaires aux points singuliers, due aux majorations ou aux redistributions des efforts dans les éléments porteurs.

Dans les DROM-COM, le caractère variable des conditions d'hygrométrie est tel que les valeurs constatées pour f_{tk} lors des essais de pastillage, servant d'hypothèses aux calculs du glissement à l'interface composite-béton, peuvent varier considérablement durant la vie de l'ouvrage. Pour cette raison, le Groupe spécialisé n°3.3 a jugé prudent d'affecter un coefficient de réduction de 0,6 à la valeur f_{tk} donnée par les essais de pastillage, en cas d'utilisation dans les DROM-COM. De plus, une attention particulière devra être portée aux températures de pointe et températures en service continu des résines.

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

2.1.1. Coordonnées

Le procédé est commercialisé par le titulaire.

Titulaire : BOUYGUES Travaux Publics Région France SAS (exploitant de la marque VSL France)

25 avenue Galilée 1564-1642

31130 BALMA

2.1.2. Identification

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

- Tissus :
 - S&P C-Sheet 240
 - S&P C-Sheet 640
- Résines :
 - Résine S3DT
 - Résine S4DT
 - Résine S5T
 - S&P Resin 55
 - S&P Resin 55 HP
 - S&P Resicem
 - S&P Resicem HP

2.2. Description

2.2.1. Principe

Le procédé V2C+ Tissus est un système de renfort structural d'éléments en béton armé et précontraint.

Tous les éléments du renfort sont fabriqués en usine à l'aide de fibres de carbone.

- Les tissus S&P C-SHEET 640, sont utilisés pour l'augmentation de résistance à l'effort tranchant des poutres.
- Les tissus S&P C-SHEET 240, collés sur la partie tendue, sont utilisés pour le renfort de poutres ou planchers à la flexion. Ils sont également utilisés pour le renfort à l'effort tranchant des poutres.

2.2.2. Caractéristiques des composants

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

- Tissus : S&P C-Sheet 240 et S&P C-Sheet 640 : présentation en rouleaux. La dénomination et le numéro de lot sont indiqués sur tous les rouleaux. Les tissus sont livrés prédécoupés en usine sur mesure ou en rouleaux de 100 mètres (S&P C-SHEET 240) et 50 mètres (S&P C-SHEET 640) ;
- Résine S3DT : Colle époxydique thixotrope sans solvant à deux composants à prise standard livrée en unités pré-dosées prêtes à l'emploi de 5 kg ;
- Résine S4DT : Colle époxydique thixotrope sans solvant à deux composants à prise lente livrée en unités pré-dosées prêtes à l'emploi de 5 kg ;
- Résine S5T : Colle époxydique thixotrope sans solvant à deux composants à prise lente livrée en unités pré-dosées prêtes à l'emploi de 5 kg ;
- S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP : Colles époxydiques bi-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en pots métalliques de 6 kg, 13 kg ou autres conditionnements sur demande ;
- S&P Resicem ou S&P Resicem HP : Colles époxy/ciment perméables à la vapeur d'eau. Ce système améliore les échanges gazeux entre l'élément enrobé et l'extérieur.

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

2.2.2.1. Tissus

Les tissus S&P C-Sheet 240 et 640 ont des modules d'élasticité différents.

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

Identification et marquage :

Exemple de désignation : S&P C-Sheet 240, 200 g

- C-Sheet 240 Référence du type de tissu
- 200 g Grammage [g/m²]

Un 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, réalisés sous la responsabilité de S&P, portant sur : le module d'élasticité, l'allongement à rupture, la densité et le diamètre du fil de carbone.

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

Superposition de couches :

Le nombre de couches est déterminé par le calcul (cf §2.3), avec 5 couches comme étant le nombre maximum de couches pouvant être superposées. Dans ce cas, l'application peut être réalisée en voie sèche ou en voie humide.

De même, les tissus peuvent être pliés dans le sens longitudinal jusqu'à obtenir 5 couches. Ceci est possible car les tissus sont unidirectionnels. Dans ce cas, l'application doit être réalisée en voie humide.

2.2.2.1.1. Dimensions des tissus S&P C-Sheet 240

Caractéristiques techniques des tissus S&P C-Sheet 240 (Unidirectionnel)	200 g/m²	300 g/m²	400 g/m²	600 g/m²
Poids des fibres [g/m ²] (sens principal)	200	300	400	600
Poids au m ² Sheet [g/m ²]	230	330	430	630
Masse volumique [g/m ³]	1,77	1,8	1,8	1,8
Allongement à la rupture [%]	1,55	1,55	1,55	1,55
Épaisseur de dimensionnement (poids des fibres/densité) [mm]	0,113	0,167	0,222	0,333
Section théorique de dimensionnement, largeur de 1000 mm [mm ²]	113	167	222	333
Livraison en rouleaux :	Largeur : 300 ou 600 mm Fabrication spéciale largeur 200 mm			

2.2.2.1.2. Dimensions des tissus S&P C-Sheet 640

Caractéristiques techniques des tissus S&P C-Sheet 640 (unidirectionnel)	400 g/m²
Poids des fibres [g/m ²] (sens principal)	400
Poids au m ² du S&P C-Sheet [g/m ²]	430
Masse volumique [g/cm ³]	2,12
Épaisseur de dimensionnement (poids des fibres/densité) [mm]	0,189
Section théorique de dimensionnement, largeur de 1000 mm [mm ²]	189
Livraison en rouleaux : (Rouleaux spéciaux sur demande)	Largeur : 300 mm

2.2.2.2. Résines

NOTA : Les domaines d'application sont les mêmes pour toutes les résines ci-après (renfort en flexion et au tranchant). La résine S&P Resicem ou S&P Resicem HP est privilégiée pour le collage des tissus en cas d'emballage complet d'éléments en béton (par exemple : renfort au tranchant où le composite ceinture la poutre, selon le cas A du §.2.3.3.2.)

2.2.2.1. Résines S&P

Les résines S&P utilisées dans le cadre du procédé V2C+ sont des résines époxy à 2 composants (Resin 55 et Resin 55 HP) ou 3 composants (Resicem et Resicem HP), sans solvant, avec durcisseur à base d'amine. Les principales caractéristiques des résines S&P sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques	Resin 55	Resin 55 HP	Resicem	Resicem HP
Température d'application [°C]	+8°C à +35°C	+8°C à +35°C	+8°C à +35°C	+8°C à +35°C
Densité [kg/l]	~1,11	~1,15	~1,36	1,30
DPU [min]	~45	~45	~50	~45
Dureté SHORE D à 7j à 23°C	>70	>70	>70	>70
Résistance à la traction sur béton sec* [N/mm ²]	> 2,5	> 3,0	> 2,5	> 3,0

*Rupture dans le béton

Consommation selon la rugosité du support béton (valeurs usuelles) :

Tissu	Résine	S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP	S&P Resicem ou S&P Resicem HP
S&P C-Sheet 240 – 200 g/m ²		Env. 600 à 800 g/m ²	Env. 1100 à 1300 g/m ²
S&P C-Sheet 240 – 300 g/m ²		Env. 700 à 1000 g/m ²	Env. 1300 à 1600 g/m ²
S&P C-Sheet 240 – 400 g/m ² S&P C-Sheet 640 – 400 g/m ²		Env. 900 à 1300 g/m ²	Env. 1400 à 1800 g/m ²

Ces valeurs peuvent être inférieures pour une pré-imprégnation mécanisée.

2.2.2.2. Résines S3DT, S4DT et S5T (valeurs à 20°C et 65% HR)

Caractéristiques	Résine S3DT	Résine S4DT	Résine S5T
Température d'application [°C]	+5°C à +30°C	+12°C à +35°C	+12°C à +35°C
Densité [kg/l]	~1,00	~0,98	~1,00
DPU [min]	>20 min à 30°C	>40 min à 30°C	>40 min à 23°C
Dureté SHORE D à 7j à 23°C	82 ±4	80 ±2	75 ± 5
Résistance à la traction sur béton sec [N/mm ²]	> 3,5	>3,5	> 3,5

Consommation selon la rugosité du support béton (valeurs usuelles) :

Tissu	Résine	Résine S3DT	Résine S4DT	Résine S5T
S&P C-Sheet 240 – 200 g/m ²		Env. 600 à 800 g/m ²	Env. 600 à 800 g/m ²	Env. 600 à 800 g/m ²
S&P C-Sheet 240 – 300 g/m ²		Env. 600 à 1000 g/m ²	Env. 600 à 1000 g/m ²	Env. 600 à 1000 g/m ²
S&P C-Sheet 240 – 400 g/m ² S&P C-Sheet 640 – 400 g/m ²		Env. 600 à 1200 g/m ²	Env. 600 à 1200 g/m ²	Env. 600 à 1200 g/m ²

2.2.2.3. Températures d'utilisation

Les valeurs présentées ci-dessous ont été définies sur la base des résultats d'essai selon NF EN 12614.

Résine	Température de transition vitreuse Tg (°C)	Température de pointe (°C) (Durée ≤ 24h)	Température de service continu (°C) (Durée > 24h)
S&P Resin 55	+44	+39,6	+30,8
S&P Resin 55 HP	+53,5	+48,2	+37,5
S&P Resicem	+44	+39,6	+30,8
S&P Resicem HP	+54	+48,7	+37,9
S3DT	+55	+50,0	+40,0
S4DT	+65	+58,5	+45,5
S5T	+75	+67,5	+52,5

2.2.2.3. Système d'ancrage

Les pièces métalliques utilisées pour la fabrication du dispositif d'ancrage (§2.3.3.4.2) peuvent être en acier S235 ou en acier S355 (partie extérieure au béton) et en acier HA B500B (partie scellée dans le béton). Elles peuvent être protégées contre la corrosion, en fonction des exigences de chaque chantier et cela pour répondre aux questions de durabilité et atmosphériques (classes de corrosivité de l'atmosphère conformes à la NF EN ISO 9223) : peinture, galvanisation, galvanisation et peinture, ou autre procédé.

Elles peuvent également être en acier inoxydable (partie extérieure et barre HA).

Dans tous les cas, les surfaces de contact seront préparées de manière adaptée au collage.

2.3. Disposition de conception

2.3.1. Dispositions générales

Le dimensionnement du renforcement doit être réalisé par un bureau d'études de structure interne ou externe.

Le présent Avis Technique vise le renforcement à la flexion et à l'effort tranchant.

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 à la flexion doit être la même que celle prise pour le dimensionnement à l'effort tranchant.

Dans ce cas, le renforcement en flexion est admis dans le cas d'un moment négatif sur l'appui considéré uniquement si le renfort au tranchant ceinture complètement la poutre (bande de tissu continue ou renfort en U mis en continuité au-dessus de la poutre).

2.3.1.1. Hypothèses de calculs

Les calculs sont menés conformément aux EUROCODES et également au BPEL 91 rev 99 en retenant les hypothèses fondamentales du calcul béton :

- Les sections droites restent planes après déformation (hypothèse de Navier Bernoulli) ;
- Il n'y a pas de glissement relatif entre les armatures existantes, la fibre de carbone et le béton ;
- La résistance à la traction du béton est négligée ;

Le comportement des matériaux aciers et béton, les coefficients de sécurité et les combinaisons des charges sont donnés dans les règlements usuels (EUROCODE 2) et dans les Recommandations provisoires de l'AFGC « Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites », édition de Février 2011.

2.3.1.2. Notations utilisées

Géométrie

b : largeur de la section

h : hauteur de la section

d : Distance entre le barycentre des armatures tendues à la fibre comprimée extrême

d' : Distance entre le barycentre des armatures comprimées à la fibre comprimée extrême

y : Profondeur de l'axe neutre

A_s (A'_s) : Section d'acier tendus (comprimés)

A_p : Section d'acier de précontrainte

A_f : Section de fibres utilisées

w_f : Largeur du composite

L_f : Longueur du composite

t_f : Epaisseur du composite

h_f : Hauteur du composite

n_f : Nombre de couches de composite superposées

m_f : Nombre de couches de composite juxtaposées
 s_f : Espacement des bandes de composites
 a : Distance entre l'axe des lamelles et le bord de l'élément libre
 A_{sw} : Section des armatures transversales
 s : Espacement des armatures transversales
 α : Angle des armatures transversales avec la fibre moyenne de la poutre
 β : Angle du composite avec la fibre moyenne de la poutre
 θ : Angle d'inclinaison des bielles de compression avec la fibre moyenne de la poutre
 $l_{anc,d}$: Longueur d'ancrage des fibres
 $l_{anc,nu}$: Longueur d'ancrage du composite choisie pour le calcul de l'effort tranchant
 l_{rec} : longueur de recouvrement des fibres

Matériaux

$f_{ck}(j)$: Résistance caractéristique à la compression du béton à j jours
 $f_{ctm}(j)$: Résistance moyenne à la traction du béton à j jours (valeur de calcul ou valeur obtenu par essais de pastillage)
 f_{cd} : Contrainte de dimensionnement retenue pour le béton en compression ($f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$)
 f_{yk} : Limite caractéristique d'élasticité de l'acier
 f_{yd} : Contrainte de dimensionnement retenue pour l'acier ($f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$)
 f_{fu} : Contrainte moyenne de traction à rupture des fibres
 f_{fud} : Contrainte limite de traction des fibres pour calcul à l'ELU
 f_{fd} : Contrainte limite de traction des fibres pour calcul à l'ELS
 σ_c : Contrainte dans le béton
 σ_s : Contrainte dans l'acier tendu
 σ_s' : Contrainte dans l'acier comprimé
 σ_f : Contrainte dans le matériau composite
 E_c : Module d'élasticité du béton
 E_s : Module d'élasticité de l'acier
 E_f : Module d'élasticité des fibres
 E_{fk} : Module d'élasticité des fibres au fractile 5%
 n : Coefficient d'équivalence acier /béton $n = \frac{E_s}{E_b}$
 n_f : Coefficient d'équivalence fibres/béton $n_f = n \cdot \frac{E_f}{E_c}$
 G_{ad} : Module de cisaillement de la résine
 $\tau_{ad,e}$: Contrainte de cisaillement moyenne à l'interface béton/composite
 τ_f : Contrainte de cisaillement moyenne à l'interface composite/composite
 τ_{fint} : Contrainte de cisaillement moyenne à l'interface acier/composite
 f_{hm} : Résistance moyenne du support en traction
 ν_{add} : Contrainte de cisaillement à l'interface composite/béton à l'ELS (MPa)
 $\nu_{ad,ud}$: Contrainte de cisaillement à l'interface composite/béton l'ELU (MPa)
 τ_{fdd} : Contrainte de cisaillement à l'interface composite/composite à l'ELS (MPa)
 $\tau_{f,ud}$: contrainte de cisaillement à l'interface composite/composite l'ELU (MPa)
 $\tau_{fint,ud}$: Contrainte de cisaillement à l'interface composite/acier à l'ELS (MPa)
 $\tau_{fint,ud}$: contrainte de cisaillement à l'interface composite/acier l'ELU (MPa)

Sollicitations :

M_1 : Moment sollicitant ELS avant renforcement
 N_1 : Effort normal sollicitant ELS avant renforcement
 σ_{s1} : Contrainte ELS dans l'acier tendue sous M1
 σ_{s1}' : Contrainte ELS dans l'acier comprimé sous M1
 σ_{c1} : Contrainte ELS dans le béton sous M1

 M_2 : Moment sollicitant ELS supplémentaire à reprendre par le composite
 N_2 : Effort normal sollicitant ELS supplémentaire à reprendre par le composite
 σ_{s2} : Contrainte ELS dans l'acier tendue sous M2
 σ_{s2}' : Contrainte ELS dans l'acier comprimé sous M2

σ_{c2} : Contrainte ELS dans le béton sous M2

M_{Ed} : Moment sollicitant ELU

$M_{Rd,0}$: Moment repris par la poutre avant renforcement

M_{Rd} : Moment ultime repris par la poutre après renforcement

Pivot A : Limite de la déformation des aciers passifs (s'il existe) ou des aciers de précontrainte au-delà de la décompression du béton

Pivot B : Limite de déformation du béton pour les pièces fléchies

Pivot C : Limite de déformation du béton en compression pure

Pivot D : Limite de déformation du composite

ε_{bo} : Déformation du béton au moment de la réparation

ε_{so} : Déformation des aciers au moment de la réparation

ε_{fd} : Déformation du composite pour le calcul ELS

ε_{fud} : Déformation ultime du composite pour le calcul ELU

ε_{ud} : Déformation ultime de calcul de l'acier

ε_{c2} : Déformation atteinte pour la contrainte maximale en compression du béton

ε_{cu2} : Déformation ultime en compression du béton

M_{Rd} : Moment ultime repris par la poutre

M_{Rdc} : Moment fléchissant repris par le béton

M_{Rdf} : Moment fléchissant repris par le composite

M_{Rds} : Moment fléchissant repris par les aciers passifs tendus

Notations BPEL 91 rev 99 :

f_{tj} : résistance caractéristique à la traction du béton âgé de j jours

f_{cj} : résistance caractéristique à la compression du béton âgé de j jours

f_e : limite élastique des aciers d'armature passive

η : coefficient de fissuration des armatures passives

f_{prg} : charge de rupture garantie

η_p : coefficient de fissuration des armatures de précontrainte

σ_p : contrainte de l'acier de précontrainte

B_t : Aire de la partie de béton tendu

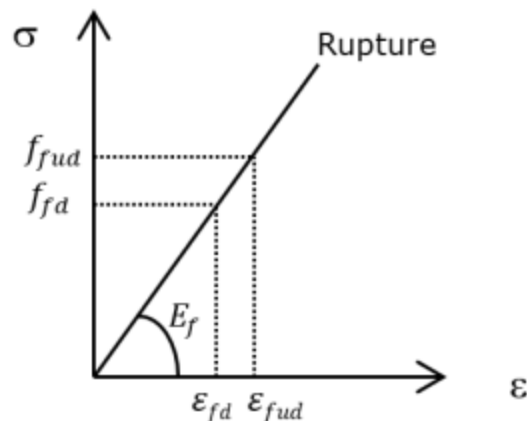
N_{Bt} : résultante des contraintes de traction

σ_{Bt} : valeur absolue de la contrainte maximale de traction

2.3.1.3. Caractéristiques techniques des produits utilisés pour le dimensionnement

2.3.1.3.1. Loi de comportement du composite

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



Avec les contraintes limite de traction du composite obtenues par :

$$f_{fud} = \frac{\alpha_f f_{fu}}{\gamma_{fd}}$$

où les coefficients $\alpha_f = 0,65$ et γ_{fd} (dépendant du type de matériau et de la combinaison d'actions) sont définis dans les Recommandations Provisoires de l'AFGC (2011) §2.2.

Les modules d'élasticité et les contraintes en traction présentés ci-après ont été déterminés conformément à la norme ISO 527-5.

2.3.1.3.1.1. Caractéristiques techniques des produits utilisée pour le dimensionnement à la flexion

		C-Sheet 240
Module E_f		240 000 MPa
Résistance moyenne à la rupture en traction f_{fu}		3720 MPa
Résistance de calcul en traction du composite		
ELS	γ_{fd}	2
	f_{fd}	1200 MPa
ELU fondamental	γ_{fd}	1,4
	f_{fud}	1720 MPa
ELU accidentel	γ_{fd}	1,1
	f_{fud}	2190 MPa

2.3.1.3.1.2. Caractéristiques techniques des produits utilisée pour le dimensionnement à l'effort tranchant

		C-Sheet 240	C-Sheet 640
Module E_f		240 000 MPa	640 000 MPa
Résistance moyenne à la rupture en traction f_{fu}		3720MPa	2560 MPa
Résistance de calcul en traction du composite			
ELU	γ_{fd}	1,4	1,4
	f_{fud}	960 MPa	1190 MPa

2.3.1.3.2. Interface béton/composite

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 à la traction du support béton f_{tk} obtenue par les essais de pastillage (Dans tous les cas, f_{tk} ne doit pas être inférieure à 1,5 MPa).

$$v_{add} = \min(v_{ad} = \alpha_{ad} \times \frac{\tau_{ade}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{tk}}{1,5}) \quad (\text{ELS})$$

$$v_{ad,u,d} = \min(v_{ad,u} = \alpha_{ad} \times \frac{\tau_{adu}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{tk}}{1,0}) \quad (\text{ELU Fondamental et Accidentel})$$

Où $\alpha_{ad} = 0,80$ ($T_g > 50 \text{ °C}$) ou $0,4$ ($T_g \leq 50 \text{ °C}$) ; $\gamma_{ad,ELS} = 1,4$; $\gamma_{ad,ELU} = 1,25$.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de v_{ad} et $v_{ad,u}$ déterminées pour chaque résine revendiquée.

Résine	v_{ad} [MPa]	$v_{ad,u}$ [MPa]
S&P Resin 55	0,28	0,32
S&P Resin 55 HP	0,57	0,64
S&P Resicem	0,24	0,25
S&P Resicem HP	0,45	0,51
S3DT	0,9	1,3
S4DT	1,1	1,6
S5T	0,8	1,1

2.3.1.3.3. Interface composite/composite

La contrainte de cisaillement moyenne à l'interface composite/composite τ_f est déterminée par essai, conformément aux recommandations de l'AFGC (Février 2011), §1.10.2 :

- S3DT/CSheet240 (300g/m²) : $\tau_f = 17,4$ MPa
- S3DT/CSheet240 (400g/m²) : $\tau_f = 12,2$ MPa
- S4DT/CSheet240 (200g/m²) : $\tau_f = 13,2$ MPa
- S4DT/CSheet240 (300g/m²) : $\tau_f = 14,6$ MPa
- S4DT/CSheet240 (400g/m²) : $\tau_f = 12,8$ MPa
- S5T/CSheet240 (300g/m²) : $\tau_f = 15,0$ MPa
- S5T/CSheet240 (400g/m²) : $\tau_f = 20,4$ MPa

Les contraintes limites de cisaillement à l'interface composite-composite à l'ELS $\tau_{f,dd}$ et à l'ELU $\tau_{f,ud}$ sont calculées comme indiqué ci-dessous :

$$\tau_{f,dd} = \alpha_{ad} \times \left(\frac{\tau_f}{\gamma_{ad,ELS}} \right)$$

$$\tau_{f,ud} = \alpha_{ad} \times \left(\frac{\tau_f}{\gamma_{ad,ELU}} \right)$$

Avec les valeurs suivantes : $\alpha_{ad} = 0,80$ $\gamma_{ad,ELS} = 1,4$ $\gamma_{ad,ELU} = 1,25$ (§ 2.2.4. du Guide AFGC de 2011)

2.3.1.3.4. Interface composite / Acier

La contrainte de cisaillement moyenne à l'interface composite/acier $\tau_{f,int}$ est déterminée par essai pour le composite S5T/CSheet240(400 g/m²):et la résine P204 (Plaque d'acier préalablement recouverte de primaire AC10):

$$\tau_{f,int} = 7,2 \text{ MPa.}$$

Les contraintes limites de cisaillement à l'interface composite-composite à l'ELS $\tau_{f,int,dd}$ et à l'ELU $\tau_{f,int,ud}$ est calculées comme suit :

$$\tau_{f,int,dd} = \alpha_{ad} \times \left(\frac{\tau_{f,int}}{\gamma_{ad,ELS}} \right)$$

$$\tau_{f,int,ud} = \alpha_{ad} \times \left(\frac{\tau_{f,int}}{\gamma_{ad,ELU}} \right)$$

Avec les valeurs α_{ad} $\gamma_{ad,ELS}$ $\gamma_{ad,ELU}$ définies au paragraphe précédent

2.3.1.4. Justification à la rupture

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

2.3.1.5. Critères de résistance du collage

2.3.1.5.1. Vérification du non-glissement à l'interface composite-béton

Cette vérification consiste à s'assurer que la contrainte de cisaillement à l'interface composite-béton n'excède pas la valeur de la contrainte limite de cisaillement.

Cette valeur limite s'appuie dans tous les cas sur des *essais de pastillage* à effectuer in situ sur le support après préparation, ragréage le cas échéant, dans l'état dans lequel il est destiné à recevoir le renforcement.

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

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

Précision concernant l'utilisation du procédé dans les DROM-COM :

En cas d'utilisation du procédé dans les départements d'Outre-Mer, la valeur f_{tk} à considérer dans les calculs est obtenue en multipliant la résistance caractéristique obtenue par les essais de pastillage par le coefficient 0,60 : $f_{tk}(\text{calcul}) = 0,60 \times f_{tk}(\text{pastillage})$

2.3.1.5.1.1. Contrainte de glissement

Le cisaillement à l'interface entre le béton et la colle vaut :

$$v_{Ed} = \left(\frac{V_u}{b_f \cdot z} \right) \cdot \left(\frac{F_f}{F_f + F_s} \right) \leq v_{ad,ud} \quad . (ELU)$$

Avec :

F_f et F_s les efforts repris respectivement par le composite et par les armatures passives dans le calcul de section ELU

$z \approx 0,9d$ à défaut d'un calcul exact

2.3.1.5.1.2. Vérification du délaminage à l'extrémité du renfort

On vérifie que le cisaillement maximal dans le béton d'enrobage est inférieur au cisaillement admissible, en considérant une répartition moyenne de la contrainte de cisaillement :

$$v_{cd} = \frac{F_f \cdot ELS}{b_f l_{anc,d}} \leq v_{add} \quad (ELS)$$

$$v_{cud} = \frac{F_f \cdot ELU}{b_f l_{anc,d}} \leq v_{adu,d} \quad (ELU)$$

2.3.1.5.2. Longueur d'ancrage et recouvrement**2.3.1.5.2.1. Longueur d'ancrage**

La longueur d'ancrage de calcul $l_{anc,d}$ est donnée par la relation suivante :

$$l_{anc,d} = \min \left\{ 200 \text{ mm} ; \frac{A_f f_{fud}}{v_{add} w_f} \right\}$$

La valeur de v_{add} est obtenue conformément au chapitre 2.2.4 du guide AFGC 2011 (cf. § 2.3.1.3.2 ci-dessus).

2.3.1.5.2.2. Longueur de recouvrement

$$l_{rec} = \max \left\{ 100 \text{ mm} ; \frac{t_f f_{fud}}{\tau_{fd}} \right\}$$

Avec :

- $\tau_{fd} = \alpha_{ad} \tau_f / \gamma_{ad}$, où τ_f est définie au §2.3.1.3.3.
- α_{ad} et γ_{ad} défini au chapitre 2.2.4 du guide AFGC.

2.3.2. Renforcement au moment fléchissant des éléments en béton armé (Eurocode 2)**2.3.2.1. Principe de calcul du renforcement**

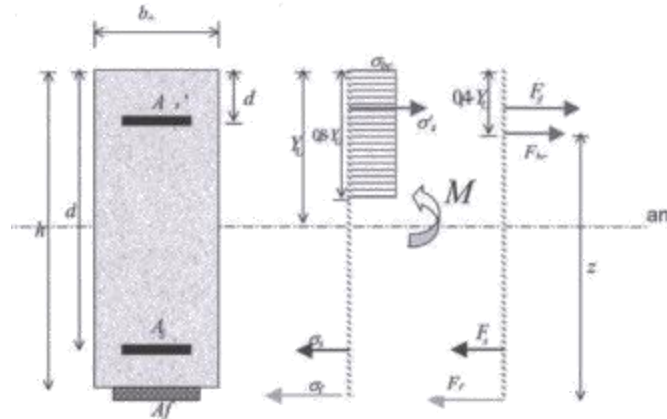
Les sollicitations de calcul obtenues en application des Eurocodes 0 et 1 ne doivent pas dépasser dans le sens défavorable les sollicitations limites de service résultant des règles énoncées ci-après. Les hypothèses de calculs sont énumérées ci-dessous :

- Les sections droites restent droites ;
- Pas de glissement relatif entre les armatures métalliques ou composites et le béton (sauf dans le cas de la précontrainte non-adhérente) ;
- La résistance à la traction du béton est négligée ;
- La résistance à la compression du composite est négligée ;
- Les diagrammes contrainte – déformation de calcul du béton, des aciers passifs et de précontrainte et du composite restent parfaitement élastiques avec les limitations citées ci-dessus pour les contraintes ;
- Les contraintes calculées pour chaque matériau doivent tenir compte du phasage de construction et de réparation ou renforcement avec les charges et sections respectives ;
- On peut supposer concentrée en son centre de gravité la section d'un groupe de plusieurs barres de ferrailage ou bandes de renfort composite, pourvu que l'erreur commise sur les déformations unitaires ne dépasse pas 5 %. On ne peut en aucun cas regrouper des aciers et des composites.
- Les déformations des sections sont limitées pour le raccourcissement unitaire du béton à 0,35%, pour l'allongement unitaire de l'acier à 4,5% si la loi de comportement avec palier plastique écrouissable est choisie, pour l'allongement des aciers de précontrainte à 2% et pour l'allongement unitaire du renfort composite à $\varepsilon_{fud} = \text{Min}\{f_{fud} / E_f ; 0,85\% \}$;
- On peut considérer que la position de l'axe neutre ne varie pas avant et après renforcement, ce qui permet de superposer les contraintes calculées sous le torseur avant renforcement et sous le torseur après renforcement, si les conditions suivantes sont respectées :

- o La distance entre la position y_1 de l'axe neutre avant renforcement et la position y_2 de l'axe neutre après renforcement est inférieure au dixième de la hauteur de la section ;
- o La contrainte de compression totale obtenue dans le béton ne dépasse pas $0,5 \cdot f_{cd}$.
- Dans le cas contraire, un calcul précis de l'état d'équilibre de la section des contraintes doit être réalisé en tenant compte du phasage.

2.3.2.2. Calcul à l'ELU

Conformément aux indications des règles AFGC 2011, §2.4.2, le calcul est mené selon le principe général du béton armé, en introduisant un niveau d'armatures supplémentaire correspondant au renfort composite.



La capacité portante d'une section en béton armé s'effectue sur la base des conditions d'équilibre en tenant compte de lois de comportement des matériaux :

- $\Sigma H=0$ - La somme des effort normaux est égale à 0
- $\Sigma M=0$ - La somme des moments est égale à 0

Les conditions d'équilibre sont contrôlées en passant les différents états d'allongement. On détermine d'abord la répartition des états d'allongement initial, par la suite pour la section renforcée on cherche par itération un état d'allongement pour lequel les forces internes et externe de l'éléments en béton armé sont en équilibre.

Les forces internes de la section sont :

$$F_s = E_s \cdot A_s \cdot \varepsilon_s - \text{Acier}$$

$$F_f = E_{fk} \cdot A_f \cdot \varepsilon_f - \text{Composite en carbone}$$

$$F_c = b_0 \times 0,8 \times y_0 \cdot f_{ck} / \gamma_c - \text{Béton}$$

Sachant que la déformation ultime des renforts composite est inférieure à la déformation ultime des armatures et que leur bras de levier est plus grand, on introduit la notion de « pivot D » : composite à son allongement ultime, qui correspond au cas le plus fréquent.

Si d'autre part les aciers passifs sont plastifiés, c'est-à-dire si $\varepsilon_s > \frac{f_{yk}}{y_s \cdot E_s}$, alors l'équilibre de la section donne :

$$A_f = \frac{M_{Ed} - A_s \cdot f_{yd} \cdot (z - (h - d)) + A'_s \cdot f_{yd} \cdot (z - (h - d'))}{z \cdot f_{ud}}$$

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

$$\mu_u = \frac{M_{Ed} + A_s \cdot f_{yd} \cdot (h - d) - A'_s \cdot f_{yd} \cdot (h - d')}{b \cdot f_{cd} \cdot h^2}$$

Il convient de vérifier que les conditions d'application du pivot D sont bien remplies, et dans le cas contraire d'effectuer les calculs en pivot A ou B.

2.3.2.3. Calcul à l'ELS

Les sollicitations de calcul obtenues en application des Eurocodes 0 et 1 ne doivent pas dépasser dans le sens défavorable les sollicitations limites de service résultant des règles énoncées dans les paragraphes qui suivent.

Les hypothèses de calculs sont énumérées ci-dessous :

- Les sections droites restent droites ;
- Pas de glissement relatif entre les armatures métalliques ou composites et le béton (sauf dans le cas de la précontrainte non-adhérente) ;
- La résistance à la traction du béton est négligée ;
- La résistance à la compression du composite est négligée ;

- Les diagrammes contrainte – déformation de calcul du béton, des aciers passifs et de précontrainte et du composite restent parfaitement élastiques avec les limitations citées ci-dessus pour les contraintes ;
- Les contraintes calculées pour chaque matériau doivent tenir compte du phasage de construction et de réparation ou renforcement avec les charges et sections respectives ;
- On peut supposer concentrée en son centre de gravité la section d'un groupe de plusieurs barres de ferrailage ou bandes de renfort composite, pourvu que l'erreur commise sur les déformations unitaires ne dépasse pas 5 %. On ne peut en aucun cas regrouper des aciers et des composites.
- On peut considérer que la position de l'axe neutre ne varie pas avant et après renforcement, ce qui permet de superposer les contraintes calculées sous le torseur avant renforcement et sous le torseur après renforcement, si les conditions suivantes sont respectées :
 - La distance entre la position y_1 de l'axe neutre avant renforcement et la position y_2 de l'axe neutre après renforcement est inférieure au dixième de la hauteur de la section ;
 - La contrainte de compression totale obtenue dans le béton ne dépasse pas $0,5 \cdot f_{cd}$.

Dans le cas contraire, un calcul précis de l'état d'équilibre de la section des contraintes doit être réalisé en tenant compte du phasage.

Les vérifications sont sous les torseurs de charges existantes avant le renforcement {N1 ; M1} et des charges supplémentaires apportées après renforcement {N2 ; M2}. Ces vérifications s'écrivent :

- $\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} \leq \sigma_{slim}$
- $\sigma_c = \sigma_{c1} + \sigma_{c2} \leq \sigma_{clim}$
- $\sigma_f \leq \sigma_{flim}$

Limitation des contraintes

- Combinaison quasi-permanente

Une limite de la contrainte de compression du béton à $\sigma_{clim} = 0,45 f_{ck}$ sous combinaison quasi-permanente. Le dépassement de cette valeur est autorisé sous réserve d'effectuer un calcul de fluage non linéaire.

- Combinaison caractéristique

Une limite de la contrainte de compression du béton à $\sigma_{clim} = 0,60 f_{ck}$ sous combinaison caractéristique

Une limite de la contrainte de traction des aciers passifs à $\sigma_{slim} = f_{yk}$ sous combinaison caractéristique

Une limite de la contrainte de traction dans le cas de précontrainte adhérente à $\sigma_{pm} = 0,80 f_{pm}$ sous combinaison caractéristique

- Hypothèses communes à l'ensemble des combinaisons

Une limite de la contrainte dans le composite à $\sigma_{flim} = f_{f,d}$

Il peut être envisagé de faire travailler les aciers passifs sur le palier plastique sans écrouissage (branche supérieure de la loi de comportement horizontale), notamment dans le cas de structures fissurées, sous réserve de l'état satisfaisant des aciers (absence de corrosion, d'endommagement plastique irréversible). Dans ce cas, on pourra adopter le coefficient de sécurité de 1,15 sur les aciers passifs. Il conviendra de s'assurer que sous sollicitations cycliques, le niveau de contrainte des aciers passifs reste suffisamment éloigné du seuil de plastification. On pourra par exemple vérifier que sous combinaison fréquente, la contrainte de traction des aciers reste inférieure à $0,8 \cdot f_{yk}$.

Prise en compte de la fissuration

La fissuration doit être limitée de telle sorte à ce qu'elle ne porte pas préjudice au bon fonctionnement ou la durabilité de la structure, ou encore qu'elle ne rende pas son aspect inacceptable. Selon l'Eurocode 2, la maîtrise de la fissuration se fait par un calcul d'ouverture de fissure et de la mise en place d'un ferrailage minimum en zone tendue sous la combinaison caractéristique. Le calcul d'ouverture des fissures permet notamment d'éviter la pénétration des agents agressifs.

- Si le renfort composite est appliqué sur la totalité de la partie de la structure fissurée, la pénétration des agents agressifs n'est pas possible. La vérification à l'ELS se limite donc à vérifier les contraintes limites citées ci-avant.
- Si le renfort composite ne recouvre pas toute la section, la question de la maîtrise de leur ouverture se pose et devra être justifiée.

Exemple de calcul des contraintes d'une section béton armé rectangulaire :

L'équilibre des forces donne :

$$0,5 \cdot b_0 \cdot y_0^2 + n \cdot \left(A_s + A_{s_r} + A_f \cdot \frac{n_f}{n} \right) \cdot y_0 - n \cdot \left(A_s \cdot d + A_{s_r} \cdot d' + A_f \cdot \frac{n_f}{n} \cdot h \right) = 0$$

D'où :

$$y_0 = \frac{-n \cdot \left(A_s + A_{s_r} + \frac{n_f}{n} \cdot A_f \right) + \sqrt{\Delta}}{b_0}$$

Avec :

$$\Delta = \left[n \cdot \left(A_s + A_{s_r} + A_f \cdot \frac{n_f}{n} \right) \right]^2 + 2 \cdot n \cdot b_0 \cdot \left(A_s \cdot d + A_{s_r} \cdot d' + A_f \cdot \frac{n_f}{n} \cdot h \right)$$

Et les coefficients d'équivalence :

- Pour les armatures passives : $n = \frac{E_s}{E_c} \approx 15$

- Pour les renforts composites : $n_f = \frac{E_f}{E_s} \cdot n$

NOTA : Les coefficients ci-dessus correspondent à un rapport usuel entre les charges permanentes et d'exploitation. Des valeurs plus précises peuvent être calculées en fonction des charges appliquées.

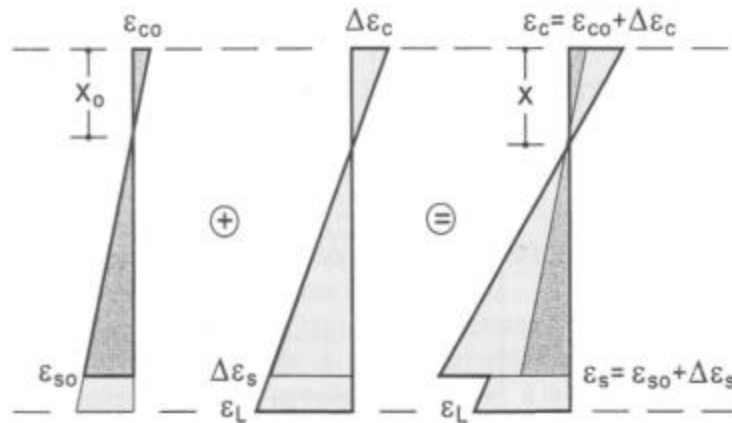
On peut alors en déduire le moment d'inertie :

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

Les contraintes sont alors calculées de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{M_1 + M_2}{I} \cdot y_0 \\ \sigma_s &= n \cdot \frac{M_1 + M_2}{I} \cdot (d - y_0) \\ \sigma_s' &= n \cdot \frac{M_1 + M_2}{I} \cdot (y_0 - d) \\ \sigma_f &= n_f \cdot \frac{M_2}{I} \cdot (h - y_0) \end{aligned}$$

Superposition des contraintes

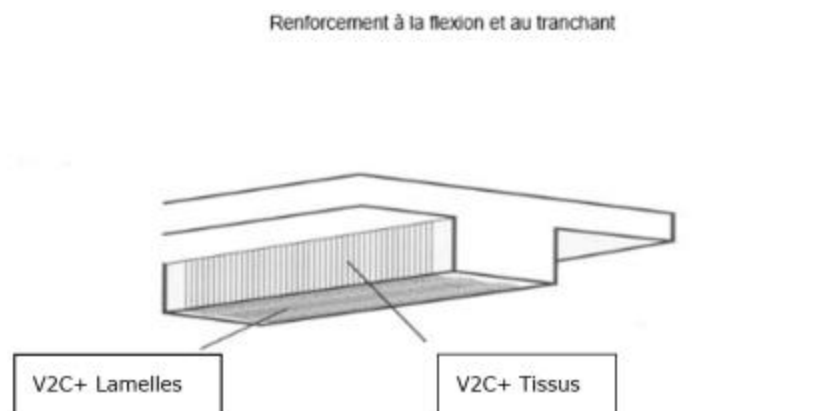


NOTA : Les formules précédentes considèrent que la position de l'axe neutre ne varie pas ou peu (de moins de 1/10^{ème} de la hauteur de la section) avant et après renforcement. Dans le cas contraire, un calcul précis de l'état d'équilibre de la section doit être réalisé.

2.3.3. Renforcement à l'effort tranchant des éléments en béton armé (Eurocode 2)

Une section renforcée ou réparée avec un composite fonctionne de manière similaire à une section de béton armé classique. Le composite se comporte en armature passive externe.

Le dimensionnement du renforcement suit les méthodes de l'Eurocode 2 en les adaptant aux caractéristiques des matériaux composites.



On détermine tout d'abord l'effort tranchant 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 exercé à l'ELU et l'effort tranchant repris par les aciers existants et le béton.

NOTA : L'effort tranchant repris par la section renforcée ne pourra pas être supérieur à $V_{Rd,max}$ défini plus loin. (cf. §2.6.3 guide AFGC 2011)

2.3.3.1. Formulation générale

La résistance à l'effort tranchant de l'élément renforcé est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$V_u \leq V_{Rd,s} + V_{Rd,f}$$

Avec :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_t}{S_t} \times 0,9 \times d \times f_{yd} \times (\cot \theta + \cot \alpha) \times \sin \alpha$$

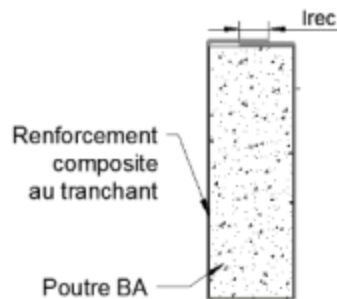
$$V_{Rd,f} = \frac{A_f}{S_f} \times z \times f_{ud} \times \frac{\sin(\beta + \theta)}{\sin \theta}$$

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

2.3.3.2. Valeur à retenir pour le bras de levier

Lors du dimensionnement, il est intéressant de différencier les cas de mises en œuvre possibles décrites dans le guide AFGC §2.6.3.

- Cas A - Le renforcement composite entoure entièrement la poutre :



Dans ce cas, le bras de levier est pris égal à la hauteur de la poutre : $z = h_{poutre}$

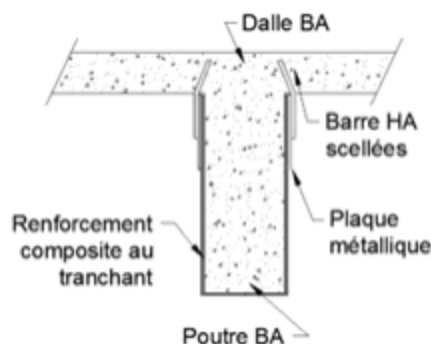
- Cas B : Le renforcement est disposé sur les joues de la poutre, avec un retour horizontal et sans dispositifs d'ancrage particulier.



Dans ce cas, le bras de levier est pris égal à la retombée de la poutre diminuée de la longueur de collage :

$$z = h_{retombée} - l_{anc,d}$$

- Cas C : Le renforcement est disposé sur les joues de la poutre, avec un retour horizontal et avec des dispositifs d'ancrage particuliers.



Dans ce cas, le bras de levier est pris égal à la retombée de la poutre : $z = h_{retombée}$

2.3.3.3. Vérification de la résistance des bielles de compression béton

Il convient également de vérifier la résistance des bielles de compression du béton, selon la formule (6.9) de l'Eurocode 2-1-1 :

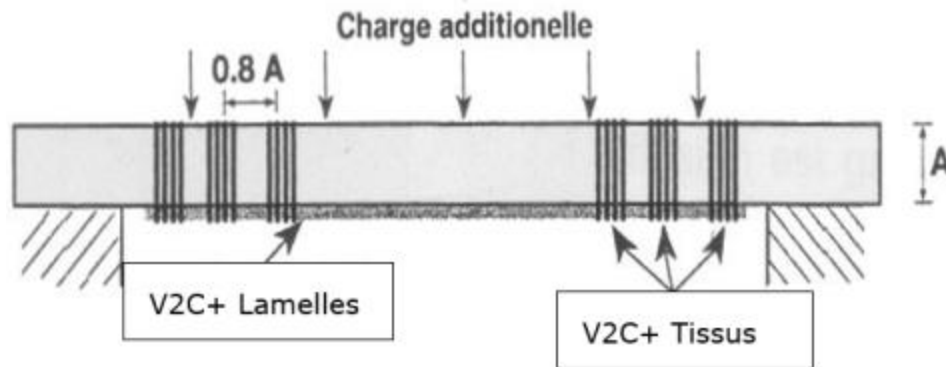
$$V_{Rd,max} = a_{cw} b_w Z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

2.3.3.4. Dispositions constructives

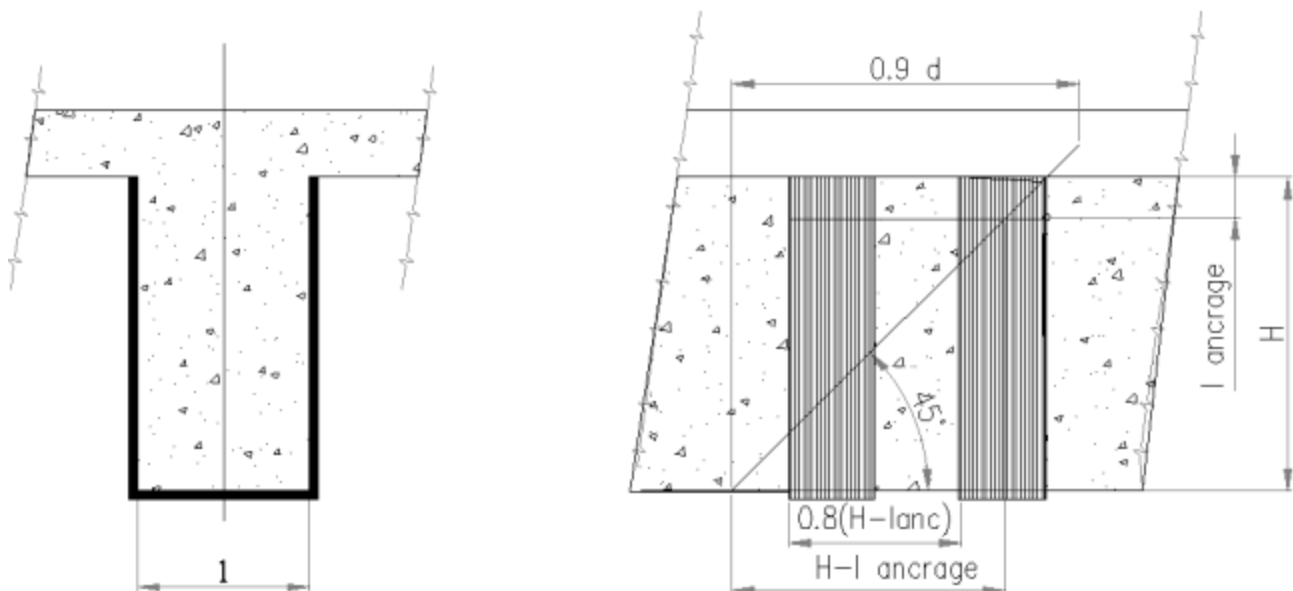
2.3.3.4.1. Tissus

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 consécutives :

- Renfort au tranchant qui ceinture la poutre : espacement limité à $0,8 \times A$. (A = hauteur totale de la poutre)



- Renfort au tranchant en U : espacement limité à $0,8 \times (H - L_{anc})$



2.3.3.4.2. Dispositions d'ancrage - Détails

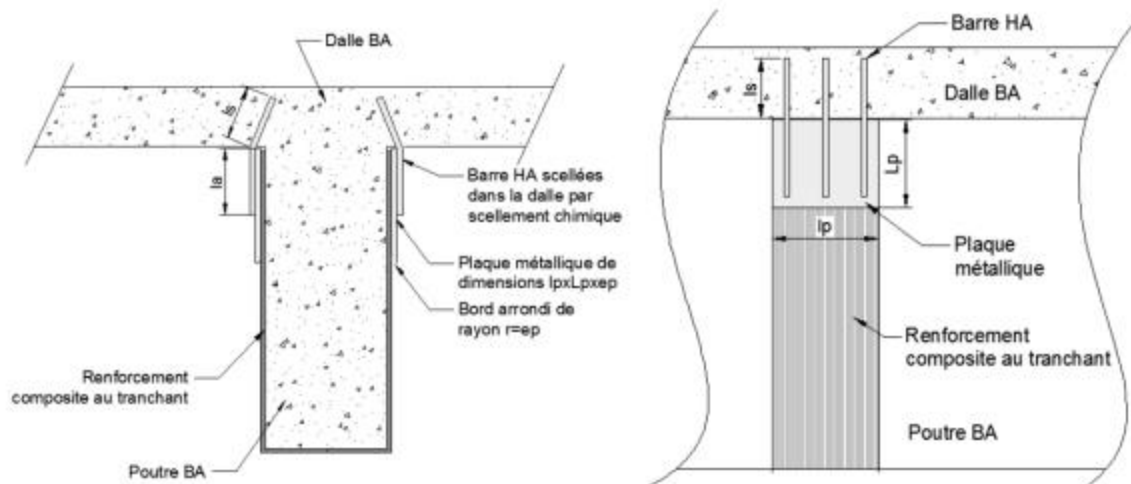
Principe

Ce dispositif d'ancrage doit tenir compte de l'état de contrainte du support béton dans lequel il est scellé.

Le principe est de s'ancrer dans la dalle par l'intermédiaire de barres HA scellées dans celle-ci. Ces barres sont soudées en atelier, sur une plaque acier, elle-même collée sur le composite.

Ces éléments en acier devront bien entendu être protégés de la corrosion.

L'ancrage par scellement chimique est calculé au cas par cas par le titulaire, sur la base de l'ETE, du produit de scellement considéré (et d'éventuels essais sur site).



Les plaques métalliques sont collées sur le composite avec la colle structurale P204 (résine utilisée dans le cadre du procédé V2C+ « Lamelles »), après préparation de surface :

- Préparation des surfaces avec un degré de soin SA 2.5 d'après la norme NF EN ISO 8501 - 1 ;
- Application d'un primaire d'accrochage AC.10 Resipoly ou équivalent.

Lors de sa mise en œuvre, la colle structurale P204 devra déborder largement de l'emprise de la plaque métallique afin d'éviter tout contact direct entre le tissu carbone et l'acier (même revêtu de son primaire d'accrochage).

Le nombre, le diamètre et la longueur de scellement l_s des barres HA, sont calculés en fonction de l'effort à ancrer amené par le renfort composite, sur la base de l'E.T.E. du produit de scellement considéré (et d'éventuels essais sur site).

Les dimensions minimales des plaques sont déterminées en vérifiant le glissement à l'interface acier-composite :

$$\frac{F_{fud}}{L_p \times l_p} \leq \alpha_{ad} \frac{\tau_{fint}}{\gamma_{ad}}$$

La valeur de la contrainte τ_{fint} est donnée au §2.3.1.3.4. . F_{fud} est l'effort ELU repris par le renfort composite ($F_{fud} = f_{fud} \times A_f$ où A_f est la section du renfort composite). La largeur maximale l_p des plaques est 30 cm.

En cas de plaque de grande longueur (> 50 cm), exposée à des variations thermiques importantes (exposition directe à l'ensoleillement, par exemple), la dilatation de l'acier sera à prendre en compte dans le dimensionnement. Dans ce cas, le terme « $\alpha_{ad} \frac{\tau_{fint}}{\gamma_{ad}}$ » sera réduit de la valeur de la contrainte de cisaillement due à la dilatation thermique différentielle ($\Delta\alpha t$) entre l'acier de la plaque et le béton support (τ_{th}).

$$\frac{F_{fud}}{L_p \times l_p} \leq \alpha_{ad} \frac{\tau_{fint}}{\gamma_{ad}} - \phi_1 \tau_{th}$$

L'amplitude thermique à considérer (ΔT) sera déterminée pour chaque cas d'application des pièces d'ancrage.

L'effort généré par la dilatation thermique (N_t) de la plaque (section transversale S) est estimé à partir de la loi de Hooke :

$$\frac{N_t}{S} = E_s \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta Temp$$

et

$$\tau_{th} = \frac{N_t}{L_p \times l_p}$$

Où :

- Section de la plaque : $S = l_p \times e_p$ [mm²]
- Effort normal dû à la dilatation thermique différentielle dans la plaque : N_t [N]
- Module d'Young de l'acier de la plaque : E_s [MPa]
- Différence de coefficient de dilatation thermique entre la plaque d'acier et le composite : $\Delta\alpha$ [°C-1]
- Amplitude thermique à considérer : $\Delta Temp$ [°C]
- $\phi_1 = 1$

Soudage des barres HA sur les plaques métalliques

Le soudage des barres HA sur les plaques métalliques, constitue un assemblage transmettant des efforts. Par conséquent, la réalisation de cet ensemble sera conforme à la norme NF-EN-ISO-17660-1 « Soudage des aciers d'armatures »

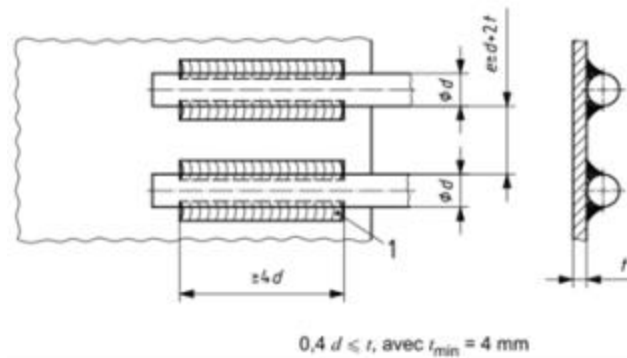
Nota :

L'entreprise en charge de l'exécution des soudures devra posséder la ou les QMOS adéquates, établir la ou les DMOS appropriées ainsi que le ou les plans de contrôle soudure.

Les soudeurs en charge de la réalisation des cordons de soudure devront être qualifiés selon les prescriptions mentionnées dans la NF-EN-ISO-17660-1. Ces opérations de soudages seront réalisées sous la responsabilité d'un coordinateur soudage.

Dispositions constructives pour le soudage des barres HA

Le type d'assemblage envisagé est un assemblage à recouvrement avec soudures latérales, tel que défini dans la NF-EN-ISO-17660-1.



2.3.4. Renforcement au moment fléchissant des éléments en béton précontraint (Eurocode 2 ou BPEL 91 rev 99)

Le dimensionnement du renforcement d'un élément en béton précontraint, suivant les principes de la norme NF EN 1992-1, est réalisé de la même manière que les éléments en béton armé. La vérification d'une section en flexion composée s'effectue selon les mêmes principes qu'exposés plus haut en 2.3.2, en ajoutant au diagramme la section A_p des armatures de précontrainte. Pour le calcul ELU, on a alors un pivot supplémentaire correspondant à la limite de déformation admissible dans les armatures de précontrainte. Aux ELS, on vérifie l'admissibilité de contraintes et l'ouverture des fissures, comme en 2.3.2.

Dans le cas de l'emploi du BPEL 91 rev 99, on suivra les indications des paragraphes qui suivent.

2.3.4.1. Condition préalable

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

Cas des éléments de prédalles précontraintes et dalles alvéolées précontraintes : compte tenu des niveaux de traction admissibles pour ces éléments, il est admis que le renforcement de ces éléments n'est pas couvert par ce document.

2.3.4.2. Vérification ELS

2.3.4.2.1. En classe 2

Aucune contrainte de traction n'est admise dans le béton lors de la mise en place des renforts.

En service, les contraintes de traction dans le béton doivent satisfaire aux valeurs du BPEL 91 rev 99 (art. 6.1.23 ; le calcul des contraintes est effectué en section non fissurée) :

- Sous combinaison rare : f_{ij} dans la section d'enrobage ; $1,5 \times f_{ij}$ ailleurs
- Sous combinaison fréquente : 0 dans la section d'enrobage

La justification en classe II est admise moyennant le respect de la condition de renfort minimal transposée de l'alinéa 6.1.32 du BPEL 91 rev 99 et détaillée ci-après.

2.3.4.2.2. En classe 3

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

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

Etape 2 : chargement de la structure renforcée

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

Limitations

- Toutes les classes :
 - Pour le béton : $0,6 f_{cj}$ sous combinaison rare (ou $0,5 f_{cj}$ sous combinaison quasi permanente)
 - Pour les fibres de carbone : σ_f
- Classe 3
 - Pour les aciers passifs :
 - En combinaison rare : $\sigma_s = \max\left\{\frac{2}{3} f_e; 110\sqrt{\eta \times f_{tj}}\right\}$
 - En combinaison fréquente : $0,35 f_e$
 - Pour les aciers de précontraintes : (exploitation)
 - En combinaison rare : la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à : $0,1 f_{prg}$ pour la post tension $\min\{0,1 \times f_{prg}; 150\eta_p\}$ pour la pré-tension
 - En combinaison fréquente : la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à 100MPa

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

2.3.4.2.3. Section minimale des renforts

La section minimale de renfort à disposer dans les zones tendues applicable aux justifications en classe II et III est de :

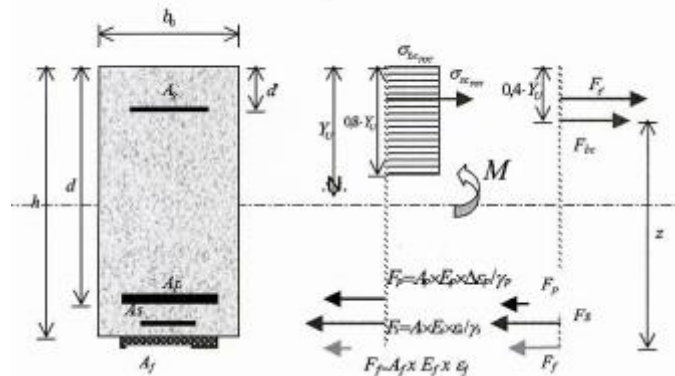
$$A_f = \frac{B_t}{1000} + \left(\frac{N_{Bt}}{\sigma_{f\lim}} - A_s - A_p \right) \frac{f_{tj}}{\sigma_{Bt}}$$

Avec :

- B_t : Aire de la partie du béton tendu
- σ_{Bt} : Valeur absolue de la contrainte maximale de traction
- N_{Bt} : Résultante des contraintes de traction correspondantes
- (Ces différentes quantités étant calculées sur la section non fissurée en classe II et en classe III)
- A_s et A_p : sections respectives des armatures passives et prétendues dont la distance au parement en traction n'excèdent pas la plus grande des deux valeurs : 5 cm ou deux tiers de la hauteur du béton tendu.

2.3.4.3. Vérification ELU

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



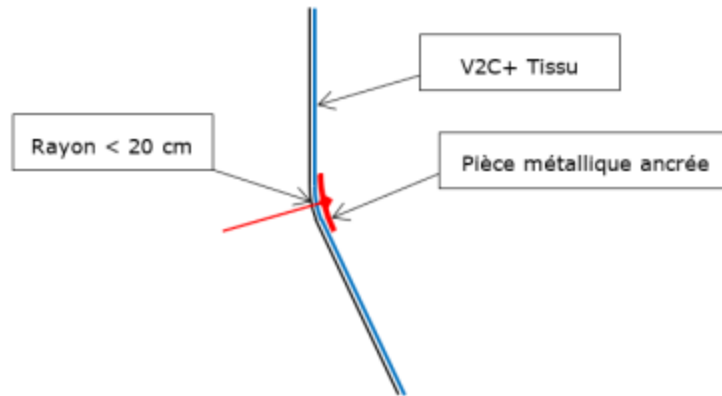
Section d'acier minimale : L'article 6.1.32 du BPEL 91 rev 99 concernant le ferrailage mini à disposer en partie tendue est à respecter :

$$A_{s\min i} = \frac{Bt}{1000} + \frac{N_{Bt}}{\sigma_{Bt}} \times \frac{f_{tj}}{f_e}$$

2.3.5. Reprise des efforts de déviation

Lorsque le système est mis en œuvre dans une zone de déviation dont le rayon est inférieur à 20 cm, la zone doit être munie d'un dispositif reprenant les poussées au vide.

Ce dispositif peut être un système de pièces métalliques ancrées dans le béton par des scellements chimiques ou des ancrages mécaniques, il sera dimensionné pour reprendre les efforts de déviation.



2.4. Dispositions de mise en œuvre

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

La mise en œuvre est effectuée systématiquement par Bouygues Travaux Publics.

2.4.1. Réception et stockage des tissus et résines au dépôt et sur chantier

Chaque livraison fait l'objet d'une vérification de conformité à la commande accompagnée d'un contrôle visuel. Une fiche de contrôle sera émise pour chaque contrôle.

2.4.2. Condition d'application

2.4.2.1. Réception des supports

Avant la mise en œuvre des renforts composite, on s'assurera que les éléments suivants sont respectés :

- Le support existant doit présenter une cohésion superficielle f_{tk} d'au moins 1,5 MPa (ELU). Au moins 3 essais de traction par pastillage, suivant les recommandations de l'AFGC, §1.12, préalable à la réception du support seront systématiquement effectués ;
- Les supports ne devront pas être contaminés en profondeur par des produits pouvant empêcher la bonne adhérence de la résine (hydrocarbures...).

Afin que le support soit sain et atteigne la cohésion superficielle nécessaire, une préparation de surface peut s'avérer nécessaire. Cette préparation peut être réalisée par :

- Brossage,
- Ponçage,
- Fraisage,
- Sablage (sec ou humide),
- Hydro-décapage,
- Grenailage.

L'objectif étant d'éliminer le béton pollué et d'obtenir une rugosité optimale de la surface recevant le composite.

Lorsque les opérations de préparation de support décrites ci-avant, ne sont pas suffisantes pour répondre au précédent critère, un traitement ou une réparation du béton contaminé sera effectué conformément à la norme NF P 95-101 (Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement) ou NF EN 1504. Par exemple pour un béton dégradé :

- Injection des fissures supérieures ou égales à 0.3 mm,
- Traitement des armatures corrodées (passivation, remplacement...),
- Reconstitution du béton (élimination du béton dégradé, ragréage...) Un essai de cohésion superficielle suivant la norme NF EN 1542 doit systématiquement être réalisé avant application.

2.4.2.2. Conditions ambiantes d'application :

- Humidité de l'air inférieure à 85%
- Température de l'air comprise entre 5°C et 35°C
- Température du support supérieure à 5°C
- Humidité du support inférieure à 5% (non ruisselant)

Le critère d'application du renforcement est défini grâce au tableau des points de rosée (en Annexe du Dossier Technique).

2.4.3. Application des tissus

Préparation des produits de carbone avant collage.

- Découpe des bandes de tissus aux dimensions indiquées sur les plans.
- Mélange des 2 constituants de la résine époxy jusqu'à l'obtention d'une teinte homogène.

Application des tissus avec les résines S3DT, S4DT ou S5T

- Imprégner le support avec la résine S3DT, S4DT ou S5T.
- Pose manuelle du tissu (pendant la DPU de la résine) en commençant par une extrémité
- Marouflage dans le sens des fibres jusqu'à l'apparition de la résine à travers la trame
- Application immédiate de la résine de fermeture

Application des tissus avec les résines Resin 55, Resin 55 HP, Resicem et Resicem HP

Méthode 1 – Application par voie sèche

- Imprégner le support avec la résine Resin 55, Resin 55 HP, Resicem ou Resicem HP
- Pose manuelle du tissu (pendant la DPU de la résine) en commençant par une extrémité
- Marouflage dans le sens des fibres jusqu'à l'apparition de la résine à travers la trame

Méthode 2 – Application par voie humide

- Pré-imprégner le tissu avec la résine Resin 55, Resin 55 HP, Resicem ou Resicem HP. Pour les grandes surfaces une machine (encolleuse) peut être utilisée.
- Imprégner le support avec la résine Resin 55, Resin 55 HP, Resicem ou Resicem HP
- Pose manuelle du tissu (pendant la DPU de la résine) en commençant par une extrémité
- Marouflage dans le sens des fibres jusqu'à l'apparition de la résine à travers la trame

Cas de couches superposées de tissus :

Répéter les opérations précédemment décrites sur la couche de fermeture non polymérisée. Dans le cas contraire, la couche de fermeture doit être dépolie au papier abrasif, puis la surface doit être nettoyée et aspirée avant la répétition des opérations précédentes.

Cas d'un renforcement avec lamelles et tissus :

Suivre les instructions pour la pose des lamelles, puis appliquer sur la zone de recouvrement la résine pour lamelles avant de suivre le processus décrivant la mise en place du tissu.

Mise en œuvre des ancrages

Réalisation des plaques :

- Soudure des aciers sur les plaques suivant la norme NF EN ISO 17660-1.
- Préparation des surfaces à coller avec un degré de soin SA2.5

Conformément à la norme, l'entreprise en charge des soudures devra être en possession des QMOS spécifiques et établir un cahier de soudage.

Opérations sur chantier :

- Repérage des aciers existants avant réalisation des forages
- Application du primaire AC10 sur le plan de collage.
- Dépolissage du composite ou sablage sur résine humide.
- Application de la P204 sur composite et AC10 sec.

2.4.4. Revêtement de protection

Le procédé V2C+ de renforcement des structures par fibres peut recevoir tout type de revêtement LHM, peinture, époxy, polyuréthane ou autre compatible avec le support. Procédure d'application dans le cas d'un LHM ou autre produit : préparation de la surface de la lamelle comme décrit précédemment + application de P204 + projection de sable ou autre

2.4.5. Contrôle de mise en œuvre

Avant application :

- Réception des Matériaux ;
- Réception du support.

Pendant application :

- Contrôle des conditions d'application ;
- Vérification des consommations de résine ;
- Contrôle durcissement de la résine au toucher.

Après application :

- Sondage au marteau
- Caméra thermique seulement si explicitement prévu dès l'origine du projet

2.5. Assistance technique

Bouygues Travaux Publics est en mesure d'apporter une assistance à la conception sur demande.
Bouygues Travaux Publics effectue systématiquement la mise en œuvre du procédé.

2.6. Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication

2.6.1. Tissus

Les tissus C-Sheet sont produits par S&P sur le site de Malborg (Pologne).

La dénomination et le numéro de lot sont indiqués sur tous les rouleaux. Les tissus sont livrés prédécoupés en usine sur mesure ou en rouleaux de 100 mètres (S&P C-SHEET 240) et 50 mètres (S&P C-SHEET 640).

2.6.2. Résines

Les résines Resin 55, Resin 55 HP, Resicem et Resicem HP sont produites par S&P sur le site de Madrid (Espagne).

Les résines S3DT, S4DT et S5T sont produites par RESIPOLY CHRYSOR sur le site de Villeneuve-Le-Roi (France).

2.6.3. Suivi de fabrication par organisme externe

Les éléments entrant dans la constitution du procédé sont fabriqués dans des usines spécialisées, suivant des principes industriels comme le tissage, et les process de fabrication de résines.

La fabrication des éléments constitutifs du procédé « V2C + Tissus » fait l'objet d'un suivi de production réalisé dans le cadre de procédures internes d'autocontrôle (matières premières, outil de production, caractéristiques mécaniques et chimiques, traçabilité, ...) 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.

2.7. Mention des justificatifs



2.7.1. Résultats expérimentaux

- Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (LGCIE)- Essai de traction cisaillement, d'adhérence sur support béton et essais à double recouvrement – 16/01/2015 – résine S3DT/C-Sheet 240, S4DT/C-Sheet 240, S5T/C-Sheet 240, S5T/C-Sheet 640
- S&P – Certificat d'essai 09/10/2018
- Laboratoire RESIPOLY – PV N°2015-01-001 Détermination de la Tg – Avril 2005 - S5T

2.7.2. Références chantiers

- Aéroport de Paris-Orly 94 (Groupe ADP) parking P2, année 2023 : renfort de poutres à l'effort tranchant

2.8. Annexes du Dossier Technique

RENFORCEMENT PAR FIBRES DE CARBONE	 																			
RÉCEPTION DES MATERIAUX COMPOSITES																				
OUVRAGE: Enregistrement N° Partie d'Ouvrage: Page: /																				
N° lot: Date de Livraison : N° BL : Matériaux (lamelles, tissus) :																				
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; padding: 2px;">Contrôles</th> <th style="text-align: center; padding: 2px;">Conforme</th> <th style="text-align: center; padding: 2px;">Non conforme</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">Bordereau de livraison</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Certificats qualité</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Dimensions</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Emballage – Contrôle visuel</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Conditions de stockage</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Contrôles	Conforme	Non conforme	Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dimensions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Contrôles	Conforme	Non conforme																		
Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Dimensions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
N° lot: Date de Livraison : N° BL : Matériaux (lamelles, tissus) :																				
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; padding: 2px;">Contrôles</th> <th style="text-align: center; padding: 2px;">Conforme</th> <th style="text-align: center; padding: 2px;">Non conforme</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">Bordereau de livraison</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Certificats qualité</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Dimensions</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Emballage – Contrôle visuel</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Conditions de stockage</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Contrôles	Conforme	Non conforme	Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dimensions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Contrôles	Conforme	Non conforme																		
Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Dimensions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
N° lot: Date de Livraison : N° BL : Matériaux (lamelles, tissus) :																				
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; padding: 2px;">Contrôles</th> <th style="text-align: center; padding: 2px;">Conforme</th> <th style="text-align: center; padding: 2px;">Non conforme</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">Bordereau de livraison</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Certificats qualité</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Dimensions</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Emballage – Contrôle visuel</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Conditions de stockage</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; padding: 2px;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Contrôles	Conforme	Non conforme	Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dimensions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Contrôles	Conforme	Non conforme																		
Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Dimensions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																		
Traitement des non-conformités : <div style="border: 1px solid black; height: 40px; margin-top: 5px;"></div>																				
FNC <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non si oui Numéro :																				
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border-right: 1px solid black; padding: 2px;">Contrôle Chantier</td> <td style="padding: 2px;">Contrôle Extérieur</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px;">Date:</td> <td style="padding: 2px;">Date:</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px;">Nom et visa:</td> <td style="padding: 2px;">Nom et visa:</td> </tr> </table>	Contrôle Chantier	Contrôle Extérieur	Date:	Date:	Nom et visa:	Nom et visa:														
Contrôle Chantier	Contrôle Extérieur																			
Date:	Date:																			
Nom et visa:	Nom et visa:																			
<i>Version du 18/01/2017</i>																				

RENFORCEMENT PAR FIBRES DE CARBONE	 
RÉCEPTION DE LA RESINE	

OUVRAGE: **Enregistrement N°**

Partie d'Ouvrage: **Page:** .../.....

N° lot:..... **Date de Livraison :** **N° BL :**

Résine (S4DT, P204, ...) :

Contrôles	Conforme	Non conforme
Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

N° lot:..... **Date de Livraison :** **N° BL :**

Résine (S4DT, P204, ...) :

Contrôles	Conforme	Non conforme
Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

N° lot:..... **Date de Livraison :** **N° BL :**

Résine (S4DT, P204, ...) :

Contrôles	Conforme	Non conforme
Bordereau de livraison	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Certificats qualité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Emballage – Contrôle visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conditions de stockage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Traitement des non-conformités :	
FNC <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non si oui Numéro :.....	
Contrôle Chantier Date: Nom et visa:	Contrôle Extérieur Date: Nom et visa:

RENFORCEMENT PAR FIBRES DE CARBONE	 
FICHE DE RÉCEPTION DES SUPPORTS	

OUVRAGE: **Enregistrement N°**

Partie d'Ouvrage: **Page:** .../.....

Vérification des plans

Plans	Indices / dates	Disponibles / Vérifiés
.....		<input type="checkbox"/>
.....		<input type="checkbox"/>
.....		<input type="checkbox"/>

Cohésion superficielle

Essais réalisés / Date	Procès verbaux	Conforme	Non conforme
.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Teneur en eau du support – Température - Hygrométrie

Teneur en eau	date mesure	Conforme	Non conforme
%		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pose appareils enregistreurs température / hygrométrie

Etat général du support

Caractéristiques	Relevé sur plans	Conforme	Non conforme
Planéité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fissuration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Armatures apparentes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dégradations	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Traitement des non-conformités :	
FNC <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non si oui Numéro :	
Contrôle Chantier	Contrôle Extérieur
Date: Nom et visa:	Date: Nom et visa:

Version du 18/01/2017

RENFORCEMENT PAR FIBRES DE CARBONE



TABLEAU DES POINTS DE ROSÉE

Température de l'air	Humidité de l'air													
	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
5 °C	-10,5	-8,7	-7,3	-5,7	-4,3	-3,3	-2,2	-1,1	-0,1	0,7	1,6	2,5	3,3	4,1
6 °C	-9,5	-7,7	-6	-4,5	-3,3	-2,3	-1,1	0,1	0,8	1,8	2,7	3,6	4,5	5,3
7 °C	-9	-7,2	-5,5	-4	-2,8	-1,5	-0,5	0,7	1,6	2,5	3,4	4,3	5,2	5,1
8 °C	-8,2	-6,3	-4,7	-3,3	-2,1	-0,9	0,3	1,3	2,3	3,4	4,5	5,4	6,2	7,1
9 °C	-7,5	-5,5	-3,9	-2,5	-1,2	0,1	2,2	2,4	3,4	4,5	5,5	6,4	7,2	8,1
10 °C	-6,7	-5,2	-3,2	-1,7	-0,3	0,8	2,2	3,2	4,4	5,5	6,4	7,3	8,2	9,1
11 °C	-6	-4	-2,4	-0,9	0,5	1,8	3	4,2	5,3	6,3	7,4	8,3	9,2	10,1
12 °C	-4,9	-3,9	-1,6	-0,1	1,5	2,8	4,1	5,2	6,3	7,5	8,6	9,5	10,4	11,2
13 °C	-4,3	-2,5	-0,7	0,7	2,2	3,6	5,2	6,4	7,5	8,4	9,5	10,5	11,5	12,3
14 °C	-3,7	-1,7	0	1,5	3	4,5	5,8	7	8,2	9,3	10,3	11,2	12,1	13,1
15 °C	-2,9	-1	0,8	2,4	4	5,5	6,7	8	9,2	10,2	11,3	12,2	13,1	14,1
16 °C	-2,1	-0,1	1,5	3,2	5	6,3	7,8	9	10,2	11,3	12,2	13,2	14,2	15,1
17 °C	-1,3	0,6	2,5	4,3	5,9	7,2	8,8	10	11,2	12,2	13,3	14,3	15,2	16,6
18 °C	-0,5	1,5	3,2	5,3	6,8	8,2	9,6	11	12,2	13,2	14,2	15,3	16,2	17,1
19 °C	0,9	2,2	4,2	6	7,7	9,2	10,5	11,7	13	14,2	15,2	16,3	17,2	18,1
20 °C	1	3,1	5,2	7	8,7	10,2	11,5	12,8	14	15,2	16,2	17,3	18,1	19,1
21 °C	1,8	4	6	7,9	9,5	11,1	12,4	13,5	15	16,2	17,2	18,1	19,1	20
22 °C	2,5	5	6,9	8,8	10,5	11,9	13,5	14,8	16	17	18	19	20	21
23 °C	3,5	5,7	7,8	9,8	11,5	12,9	14,3	15,7	16,9	18,1	19,1	20	21	22
24 °C	4,3	6,7	8,8	10,8	12,3	13,8	15,3	16,5	17,8	19	20,1	21,1	22	23
25 °C	5,2	7,5	9,7	11,5	13,1	14,7	16,2	17,5	18,8	20	21,1	22,1	23	24
26 °C	6	8,5	10,6	12,4	14,2	15,8	17,2	18,5	19,6	21	22,2	23,1	24,1	25,1
27 °C	6,9	9,5	11,4	13,3	15,2	16,5	18,1	19,5	20,7	21,9	23,1	24,1	25	26
28 °C	7,7	10,2	12,2	14,2	16	17,5	19	20,3	21,7	22,8	24	25,1	26,1	27
29 °C	8,7	11,1	13,1	15,1	16,8	18,5	19,9	21,3	22,5	22,8	25	26	27	28
30 °C	9,5	11,8	13,9	16	17,7	19,7	21,3	22,5	23,8	25	26,1	27,1	28,1	29
32 °C	11,2	13,8	16	17,9	19,7	21,4	22,8	24,3	25,6	26,7	28	29,2	30,2	31,1
34 °C	12,5	15,2	17,2	19,2	21,1	22,8	24,2	25,7	27	28,3	29,4	31,1	31,9	33
36 °C	14,6	17,1	19,4	21,5	23,2	25	26,3	28	29,3	30,7	31,8	32,8	34	35,1
38 °C	16,3	18,8	21,3	23,4	25,1	26,7	28,3	29,9	31,2	32,3	33,5	34,6	35,7	36,9
40 °C	17,9	20,6	22,6	25	26,9	28,7	30,3	31,7	33	34,3	35,6	36,8	38	39

Exemple: Humidité de l'air 50 %

Température ambiante: 15 °C

Formation du point de rosée à une température de 4 °C

L'application du revêtement est possible si la température du support est supérieure ou égale à $4 + 3 = 7$ °C

RENFORCEMENT PAR FIBRES DE CARBONE	
MISE EN OEUVRE	

OUVRAGE: **Enregistrement N°**

Partie d'Ouvrage: **Page:**...../.....

Etat du support

	Conforme/Absent	Non conforme
Planéité (<8mm sous la règle de 2m ; <3mm sous la règle de 20cm)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fissure (ouverture < 0,3mm)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Armatures apparentes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Décrochement / Arrêtes vives	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nids de cailloux.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pose de tissu

Date d'application :	Température de l'air : °C
Température du support:°C	Hygrométrie ambiante : %

(Mesures prises au démarrage du poste)

	Conforme	Non conforme
Application de la résine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pose du tissu (marouflage, continuité des fibres)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Après polymérisation

	Conforme	Non conforme
Sondage maillet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<small>(Conforme = Absence de défaut ponctuel > 25cm² et/ou la surface cumulée des défauts < 10% de la surface du lé)</small>		

Pose des ancrages

	Conforme	Non conforme
Implantation (+/-120mm)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Scelllements des tiges filetées (nettoyage du trou...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Collage des ancrages sur les lés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Protection (Mortier)

	Conforme	Non conforme
Propreté du support – Visuel et toucher	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Recouvrement - Visuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Traitement des non-conformités :	
FNC <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non si oui Numéro :.....	
Contrôle Chantier	Contrôle Extérieur
Date: Nom et visa:	Date: Nom et visa:

Version du 18/01/2017