

Sur le procédé

BETONTEX - Preformed Laminate Systems

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

Titulaire(s) : Société Fibre Net

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	Première version de l'Avis Technique	PAYET Loïc	BERNARDIN-EZRAN Roseline

Descripteur :

Procédé de renforcement à la flexion d'éléments de structure, consistant à coller à la surface des éléments à renforcer des lamelles de carbone à l'aide d'une résine époxydique synthétique 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 conférée par la résine après son durcissement, entre les deux matériaux.

Le procédé « BETONTEX – Preformed Laminate Systems » peut être associé au procédé « BETONTEX – Wet Lay-Up Systems » qui fait l'objet d'un Avis Technique en cours de validité.

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.	Aspects sanitaires	5
1.3.	Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé	5
2.	Dossier Technique	6
2.1.	Mode de commercialisation	6
2.2.	Description	6
2.2.1.	Principe	6
2.2.2.	Caractéristiques des composants	6
2.2.3.	Produits complémentaires	9
2.3.	Dispositions de conception	9
2.3.1.	Loi de comportement des matériaux	9
2.3.2.	Adhérence et contrainte de cisaillement admissible	11
2.3.3.	Justification à la rupture	12
2.3.4.	Calcul de renforcement en flexion à l'Eurocode 2	12
2.3.5.	Calcul de renforcement en flexion simple au BAEL91 révisé 99	20
2.4.	Mise en œuvre	27
2.4.1.	Travaux préparatoires	27
2.4.2.	Conditions climatiques et d'environnement lors de la mise en œuvre	27
2.4.3.	Mise en œuvre des procédés	28
2.4.4.	Contrôle de la mise en œuvre	29
2.5.	Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication	29
2.5.1.	Contrôles de fabrication	29
2.5.2.	Identification du produit	29
2.6.	Résultats expérimentaux	29
2.7.	Références	29
2.7.1.	Références chantier	29

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

Le procédé BETONTEX – Preformed Laminate System est utilisé pour le renforcement à la flexion des éléments 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'augmentation des capacités résistantes par les procédés de renforcement est limitée aux actions variables au sens de la norme NF EN 1991-1.

Le renforcement structurel de radiers ou dallages n'est pas visé dans le cadre du présent Avis Technique.

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 de la fatigue. On peut citer, à titre d'exemple de charges exclues, les machines tournantes et les passages intensifs et répétés de camions. L'utilisation des procédés pour le renforcement des dallages n'est pas visée dans le cadre du présent Avis Technique.

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

Les utilisations autres que celles prévues au présent domaine d'emploi, notamment les renforcements d'éléments constitués de matériaux autres que le béton (maçonnerie, bois ou métal), 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 52,2°C en pointe (durée $\leq$ 24h) et 40,6°C en continu (durée $>$ 24h).

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 AFGC de 2011).

L'utilisation du procédé sur support ruisselant est exclue du domaine d'emploi : le taux d'humidité résiduel du support ne devra pas excéder 5% et l'humidité relative de l'air devra être inférieure à 95%.

Le procédé BETONTEX-Peformed Laminate System 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.

Le système ne prévoit pas de chevauchement entre les lamelles.

Le double encollage n'est pas visé par cet Avis Technique.

Les lamelles visées par le présent Avis Techniques peuvent être associées au système « BETONTEX Wet Lay-Up System » qui fait l'objet d'un Avis Technique en cours de validité. Le « BETONTEX Wet Lay-Up System » permet de reprendre l'effort tranchant.

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 établi par le demandeur, à condition de respecter strictement les prescriptions du présent Avis.

1.2.1.2. Sécurité en cas d'incendie

1.2.1.2.1. Réaction au feu

En l'absence de Procès-Verbal de réaction au feu, les éléments entrant dans la constitution du système « BETONTEX-Peformed Laminate System » sont non-classés.

1.2.1.2.2. Résistance au feu

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

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

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

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

Dans le cas où des dégradations (chocs, abrasion, etc.) sont possibles, une protection mécanique du renforcement est à prévoir. Lorsque des revêtements (notamment peintures) sont prévus sur le renforcement, ils doivent avoir fait l'objet d'essais préalables validant leur adhérence sur la matrice époxydique des composites.

1.2.3. 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

1.3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

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

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.

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.

La conception du renforcement collé ne peut être réalisée que par un Bureau d'Etudes Structures formé par FibreNET à la méthode de dimensionnement détaillée dans le Dossier Technique. La liste des Bureaux d'Etudes Structures formés est tenue à jour par la société FibreNET.

Les entreprises réalisant la mise en œuvre du procédé doivent fournir, pour chaque chantier, les fiches d'autocontrôle 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.

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 est commercialisé par la société FibreNET sous la marque BETONTEX-Peformed Laminate System.

Titulaire :

Société Fibre Net S.p.A.

Via Jacopo Stellini, 3

33050 PAVIA DI UDINE (Italie)

Tél. : +39 0432 600918

Email : info@fibrenet.it

Internet : fibrenet.it/fr

En cas de question sur la conception ou la mise en œuvre du procédé, il convient d'adresser un courriel à l'adresse : sukaina.elrifai@fibrenet.it.

2.2. Description

2.2.1. Principe

Le procédé BETONTEX Preformed Laminate Systems est une technique de renforcement de structures en béton armé ou précontraint. Le BETONTEX Preformed Laminate Systems est composé d'un plat extrudé, fabriqué en usine par pultrusion, en fibres de carbone pré encollé par une résine époxy, avec application préalable systématique d'un primaire d'accroche sur la surface de l'élément à renforcer.

Le double encollage des lamelles n'est pas visé.

2.2.2. Caractéristiques des composants

2.2.2.1. Résine et primaire

Les résines suivantes sont utilisées avec le procédé BETONTEX Preformed Laminate Systems :

- Betontex FB RC01 : est un primaire époxydique, bi-composant fluide translucide utilisé pour la primarisation du support avant application de la résine de collage Betontex FB RC30/3.

Cette résine primaire doit être systématiquement appliquée sur la surface de l'élément à renforcer préalablement au collage de la lamelle avec la résine FB RC30/3.

Cette résine primaire est fournie en deux composants (A et B), pré-dosés et à mélanger avant l'application, en emballages de 6 kg (4 kg composant A et 2 kg composant B) ou de 1,5 kg (1,0 kg composant A et 0,5 kg composant B) ou de toute autre manière dans des emballages respectant le rapport de poids 2 :1.

- Betontex FB RC30/3 : est une colle époxydique bi-composante, visqueuse, de couleur jaune translucide utilisée pour le collage des lamelles pultrudées en fibre de carbone Betontex FB-G14L-HT, Betontex FB-G14L-HM, Betontex FB-G14L-HMM, Betontex FB-G12L-HT, Betontex FB-G12L-HM, Betontex FB-G12L-HMM.

Cette résine de collage est fournie en deux composants (A et B), pré-dosés et à mélanger avant l'application, en emballages de 5 kg (4 kg composant A et 1 kg composant B) ou en cartouches de 600 g (dont les composants "A" et "B" sont auto-mélangés lors de l'éjection de la cartouche) ou de toute autre manière dans des emballages respectant le rapport de poids 4 :1.

Tableau 1 - Caractéristiques des résines de la gamme

Caractéristique	Primaire FB-RC01	Colle FB-RC30/3
Masse volumique	1,05 kg/l	1,65 kg/l
Résistance à la traction sur béton	> 1,5 N/mm ² (rupture dans le béton)	
Humidité du support à l'application	< 5 %	
DPU	45 min.	70 min.

Les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus correspondent aux valeurs à 20°C et à 65% d'humidité relative.

Tableau 2 Températures d'utilisation des résines de la gamme

	Primaire FB-RC01	Colle FB-RC30/3
Température de transition vitreuse	58°C	60,1
En service continu (durées > 24h)	40,6°C	42,1°C
En pointe (durées ≤ 24h)	52,2°C	54,1°C

Tableau 3 Consommation de résine en fonction de la largeur de la lamelle utilisée

Largeur de lamelle	Consommation de FB-RC01*	Consommation de FB-RC30/3*
50 mm	~ 10 g/ml	~ 150 g/ml
60 mm	~ 12 g/ml	~ 180 g/ml
80 mm	~ 16 g/ml	~ 240 g/ml
90 mm	~ 18 g/ml	~ 270 g/ml
100 mm	~ 20 g/ml	~ 300 g/ml
120 mm	~ 24 g/ml	~ 360 g/ml
150 mm	~ 30 g/ml	~ 450 g/ml

*La consommation peut être plus élevée en fonction de la planéité et de la rugosité du support.

Pour les résines, les composants A et B sont produits (à mélanger dans un rapport spécifique) et une étiquette portant les champs suivants est apposée sur les emballages respectifs :

- L'identification du fabricant ;
- L'identification du produit avec son code et son nom commercial ;
- La quantité de l'emballage, exprimée en kg de produit ;
- Le numéro de lot de production de la résine.

2.2.2.2. Lamelles pultrudées

Le plat carbone BETONTEX Preformed Laminate Systems est un plat pultrudé de fibres de carbone agglomérées dans une matrice de résine époxydique.

L'utilisation de cette lamelle en fibre de carbone, à coller au support à l'aide de résines polymères thermodurcissables, permet d'augmenter la résistance de l'élément renforcé, en particulier face aux contraintes de traction. L'intervention se déroule de manière ponctuelle, en calibrant la quantité et la disposition des lamelles afin d'optimiser les propriétés mécaniques du renforcement en fonction des besoins d'amélioration requis.

Les lamelles « BETONTEX Preformed Laminate Systems » sont disponibles en deux épaisseurs différentes (1.4 mm et 1.2 mm) et trois performances mécaniques différentes, en fonction du besoin : haute ténacité (Gamme « HT »), module d'élasticité élevé (Gamme « HM ») et module d'élasticité très élevé (Gamme « HHM »). Le choix de la lamelle est arrêté en fonction des résultats des calculs de dimensionnement.

Le taux volumique des fibres de carbone contenues dans les lamelles est au minimum de 68%. Ces fibres sont noyées dans une matrice époxydique dont la température de transition vitreuse est supérieure à > 100 °C.

Les caractéristiques géométriques des lamelles sont indiquées dans le Tableau 4 et les caractéristiques mécaniques des lamelles sont indiquées dans le Tableau 5.

Tableau 4 - Dimensions des lamelles

Type de lamelles	Largeur	Épaisseur	Section
Gamme "HT"	[mm]	[mm]	[mm ²]
Betontex-FB-G14L-HT050	50	1,4	70
Betontex-FB-G14L-HT060	60	1,4	84
Betontex-FB-G14L-HT080	80	1,4	112
Betontex-FB-G14L-HT100	100	1,4	140
Betontex-FB-G14L-HT120	120	1,4	168
Betontex-FB-G14L-HT150	150	1,4	210
Betontex-FB-G12L-HT050	50	1,2	60
Betontex-FB-G12L-HT060	60	1,2	72
Betontex-FB-G12L-HT080	80	1,2	96
Betontex-FB-G12L-HT100	100	1,2	120
Betontex-FB-G12L-HT120	120	1,2	144
Betontex-FB-G12L-HT150	150	1,2	180
Gamme "HM"			
Betontex-FB-G14L-HM050	50	1,4	70
Betontex-FB-G14L-HM060	60	1,4	84
Betontex-FB-G14L-HM080	80	1,4	112
Betontex-FB-G14L-HM100	100	1,4	140
Betontex-FB-G14L-HM120	120	1,4	168
Betontex-FB-G14L-HM150	150	1,4	210
Betontex-FB-G12L-HM050	50	1,2	60
Betontex-FB-G12L-HM060	60	1,2	72
Betontex-FB-G12L-HM080	80	1,2	96
Betontex-FB-G12L-HM100	100	1,2	120
Betontex-FB-G12L-HM120	120	1,2	144
Betontex-FB-G12L-HM150	150	1,2	180
Gamme "HHM"			
Betontex-FB-G14L-HHM050	50	1,4	70
Betontex-FB-G14L-HHM060	60	1,4	84
Betontex-FB-G14L-HHM080	80	1,4	112
Betontex-FB-G14L-HHM100	100	1,4	140
Betontex-FB-G14L-HHM120	120	1,4	168
Betontex-FB-G14L-HHM150	150	1,4	210
Betontex-FB-G12L-HHM050	50	1,2	60
Betontex-FB-G12L-HHM060	60	1,2	72
Betontex-FB-G12L-HHM080	80	1,2	96
Betontex-FB-G12L-HHM100	100	1,2	120
Betontex-FB-G12L-HHM120	120	1,2	144
Betontex-FB-G12L-HHM150	150	1,2	180

Les lamelles sont fournies sous forme de rouleaux disponibles en longueurs 25m, 50m ou 100m. Les lamelles sont ensuite à couper sur chantier à l'aide d'une lame diamantée selon les besoins. Des deux côtés de la lamelle, un film est disposé pour protéger le produit de la saleté pendant les opérations de manutention et de découpe. Ce film doit être retiré avant application.

Les lamelles sont identifiées et marquées par l'apposition d'une étiquette sur l'emballage, contenant les champs suivants :

- L'identification du fabricant ;
- L'identification du produit avec son code et son nom commercial ;
- La quantité de l'emballage, exprimée en mètres linéaires de produit ;
- Le numéro de lot de production du produit.

2.2.2.3. Données environnementales

Aucune donnée environnementale couvrant les composants du système « BETONTEX – Preformed Laminate Systems » n'est disponible sur la base INIES.

2.2.3. Produits complémentaires

Dans le cas où les supports en béton seraient dégradés et avec une armature exposée et oxydée, il est nécessaire d'intervenir afin de rétablir l'intégrité des sections et d'inhiber les processus oxydatifs. De plus, la restauration est nécessaire afin de garantir un support correct pour l'application des renforts.

Vous trouverez ci-dessous la liste des matériaux utiles possibles pour restaurer le support et protéger le renfort :

STRUTTURA TIXO - TX 259

Mortier cimentaire structural fibré de classe R4 au sens de la norme NF EN 1504-3 utilisé pour la réparation des bétons.

INTEGRA FERRO - FR 718

Passivant cimentaire conforme à la NF EN 1504-7 utilisé pour la protection des armatures.

STRUTTURA RASO FINO RF - 248

Mortier cimentaire structural fibré de classe R3 au sens de la norme NF EN 1504-3 utilisé pour la réparation des bétons. Peut également être utilisé comme mortier de lissage.

2.3. Dispositions de conception

Un diagnostic préalable (détermination de la géométrie et des éléments constitutifs de l'élément à renforcer) aussi précis que possible doit être réalisé préalablement au dimensionnement du renforcement.

Le dimensionnement du renforcement doit être réalisé par un bureau d'étude spécialisé en renforcement de structures. La société FibreNET tient à jour une liste des BET Structures formés au dimensionnement du procédé « BETONTEX – Preformed Laminate Systems ».

2.3.1. Loi de comportement des matériaux

Les lois de comportement retenues pour le béton et l'acier sont celles figurant dans l'Eurocode 2 (section 3).

2.3.1.1. Béton

Les contraintes limites en compression du béton pour le calcul des sections sont données par l'Eurocode 2 (EC2-1-1 3.1) :

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \text{ pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \text{ pour } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

Avec :

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

$\gamma_c = 1,5$ pour les combinaisons fondamentales

$\gamma_c = 1,2$ pour les combinaisons accidentelles

f_{ck} la contrainte caractéristique à la compression du béton

n est l'exposant indiqué dans le tableau 3.1 de l'Eurocode 2.

ε_{c2} est la déformation atteinte pour la contrainte maximale (cf. tableau 3.1 de l'Eurocode 2)

ε_{cu2} est la déformation ultime (tableau 3.1 de l'Eurocode 2)

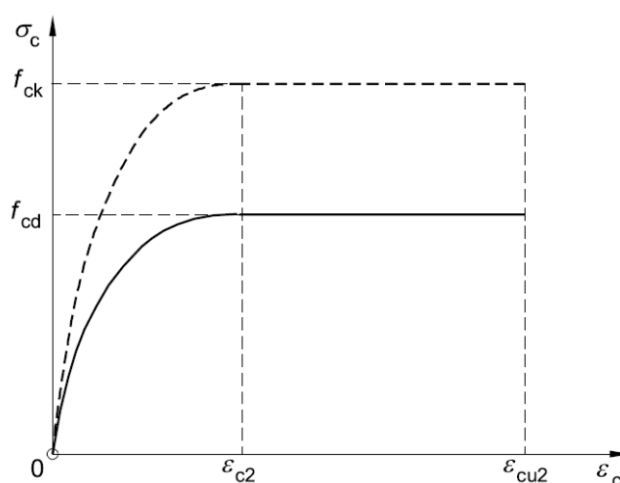
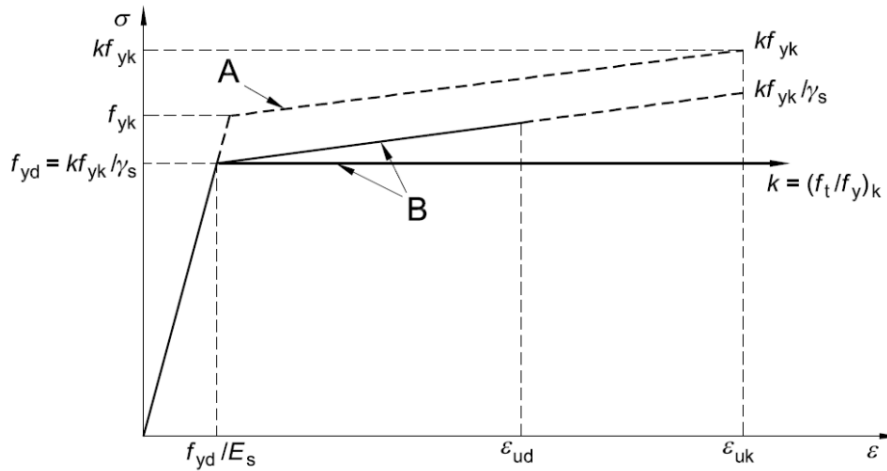


Figure 1 - Loi de comportement du béton en compression (EC2)

2.3.1.2. Aciers

Dans le cas des armatures de béton armé (EC2-1-1 3.2), la contrainte à la limite d'élasticité en traction de l'acier est donnée par :



A - diagramme simplifié

B - diagramme de calcul

$$f_{y,d} = f_{yk} / \gamma_s$$

Avec :

f_{yk} la limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé

$\gamma_s = 1,15$ aux ELU pour les combinaisons fondamentales

$\gamma_s = 1$ aux ELU pour les combinaisons accidentelles

Les valeurs de k sont données dans l'annexe C de l'Eurocode 2 en fonction du type d'aciers mis en œuvre (différentes classes de ductilité).

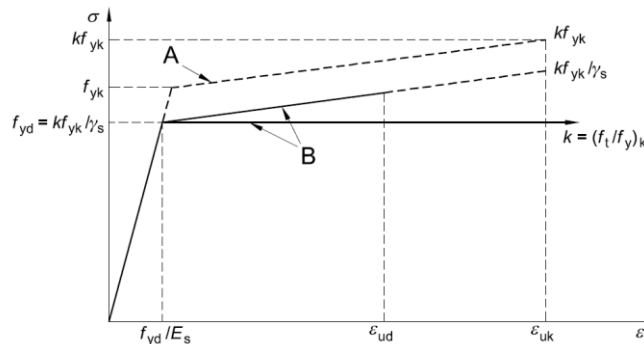


Figure 2 - Loi de comportement de l'acier

Dans le cas des aciers de précontrainte, plusieurs lois de comportement peuvent être utilisées :

- La loi bilinéaire à palier horizontal
- La loi bilinéaire à palier incliné avec limite de déformation.

Avec :

γ_s = coefficient partiel de l'acier de précontrainte dont la valeur est :

- 1,15 en situation durable et transitoire
- 1 en situation accidentelle

Dans le cas d'utilisation de la loi bilinéaire avec palier incliné, la valeur limite de résistance est définie par l'allongement maximal de calcul ϵ_{ud} dont la valeur recommandée vaut 2%.

2.3.1.3. Composites

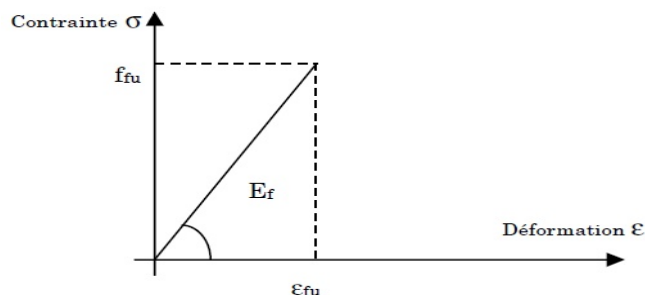


Figure 4 - Loi de comportement du composite - Courbe contrainte/déformation

La contrainte ultime à l'ELU en traction du composite est donnée par : $f_{fud} = f_{fu} \times (\alpha_f / \gamma_{fd})$

La contrainte ultime à l'ELS en traction du composite est donnée par : $f_{fd} = f_{fu} \times (\alpha_f / \gamma_{fd})$

Avec dans le cas des matériaux composites :

$\alpha_f = 0,65$ coefficient pour prendre en compte les effets liés au vieillissement des matériaux organiques,

γ_{fd} = coefficient partiel de sécurité

Matériau composite	ELS	γ_{fd}	
		ELU	
		Fondamental	Accidentel
Betontex – Preformed Laminate System	1,4	1,25	1

En synthèse voici les caractéristiques des composites :

Tableau 5 - Caractéristiques mécaniques des lamelles (Les valeurs de résistance en traction des lamelles ont été déterminées conformément à la norme NF EN 2561)

	Gamme « HT »	Gamme « HM »	Gamme « HHM »
f_{fu} (N/mm ²) valeur moyenne	2824	2251	2503
Résistance caractéristique à la rupture (N/mm ²)	2592	2109	2383
f_{fud} (N/mm ²)	1468	1171	1302
f_{fd} (N/mm ²)	Min{1311 MPa ; $0.9\sigma_{slim}$ }*	Min{1045 MPa ; $0.9\sigma_{slim}$ }*	Min{1162 MPa ; $0.9\sigma_{slim}$ }*
E_f (N/mm ²) valeur moyenne	168000	216000	249000
Valeur caractéristique du module d'élasticité (N/mm ²)	158000	205000	236000
ϵ_{fu}	16.9 ‰	10.7 ‰	10.7 ‰
ϵ_{fud}	8.8 ‰	5.6 ‰	5.6 ‰
t_f (mm)	1.4	1.4	1.4

Seules les valeurs moyenne sont à prendre en compte dans les calculs.

*Avec $\sigma_{slim} = 0.8.f_{yk}$

Tableau 6 - Efforts de calcul ELU des lamelles en épaisseur 1,4mm

	Gamme "HT"						Gamme "HM"						Gamme "HHM"					
Epaisseurs (mm)	1.4						1.4						1.4					
Largeurs (mm)	50	60	80	100	120	150	50	60	80	100	120	150	50	60	80	100	120	150
F_{ELU} (kN)	102.8	123.3	164.4	205.5	246.6	308.3	82.0	98.4	131.2	163.9	196.7	245.9	91.1	109.4	145.8	182.3	218.7	273.4

2.3.2. Adhérence et contrainte de cisaillement admissible

Conformément aux recommandations de l'AFGC (Edition Février 2011), la contrainte limite de cisaillement de l'interface composite-béton ou de la colle pour le procédé « BETONTEX- Preformed Laminate Systems est déterminée à partir des résultats d'essais de la façon suivante :

Tableau 7 - Caractéristiques mécaniques de l'interface composite/béton

Caractéristiques mécaniques	Lamelles de la gamme « HT » / Résine FB RC 30/3	Lamelles de la gamme « HM » / Résine FB RC 30/3	Lamelles de la gamme « HHM » / Résine FB RC 30/3
Contrainte de cisaillement à la rupture τ_{ad} (MPa)	4,47	4,87	4,97
Contrainte moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique : $\tau_{ad,e}$ (MPa)	3,62	3,99	4,00
Contrainte de cisaillement ELU (MPa) :	$v_{ad,ud} = \min \left(\alpha_{ad} * \frac{\tau_{ad,e}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{ctm}}{\gamma_{td}} \right)$		
Contrainte de cisaillement ELS V_{add} (MPa) :	$v_{ad,d} = \min \left(\alpha_{ad} * \frac{\tau_{ad,e}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{ctm}}{\gamma_{td}} \right)$		

Dans les formules ci-dessus, on a :

$\alpha_{ad}=0,8$ (La température de transition vitreuse de la résine étant supérieure à 50°C)

et :

	ELS	ELU	
		Fondamental	Accidentel
γ_{ad}	2	1,4	1,1
γ_{td}	3/2	1	1

2.3.3. Justification à la rupture

Cette justification est à effectuer dans tous les cas hors situation 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) $G + Q_1 + \Psi_{oi}.Q_i$, où G représente la sollicitation due à la charge permanente et $\Psi_{oi}.Q_i$ celle due aux charges de courte durée d'application dites d'accompagnement de l'action de base Q_1 , y compris s'il y a lieu les charges climatiques et celles dues aux instabilités.

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

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

(R1) $\geq 0,50$ (S2), dans le cas d'un élément secondaire, dont la rupture n'est pas susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (panneaux de dalles de planchers posés sur poutres, par exemple).

Avec, dans ces expressions :

R1 : capacité résistante à l'ELU, en situation fondamentale, de l'élément non renforcé ;

S2 : sollicitation agissante à l'ELU, en situation fondamentale, sur l'élément renforcé.

2.3.4. Calcul de renforcement en flexion à l'Eurocode 2

Le dimensionnement étudié est celui du renforcement des structures en béton armé. Le dimensionnement doit être réalisé par un bureau d'études techniques spécialisé faisant partie de la liste (conservée et tenue à jour par Fibre Net S.p.A) des bureaux d'études structures compétents pour ce type de dimensionnement.

La responsabilité de Fibre Net S.p.A. ne peut être engagée sur les hypothèses de calcul saisies.

Une section renforcée se comporte de la même manière qu'une section de béton armé.

Le composite se comporte en armature externe. Ainsi, le dimensionnement du renforcement suit les règles de l'Eurocode 2 concernant les armatures en acier en les adaptant aux caractéristiques des matériaux composites

Pour cela, on complète les règles de l'Eurocode 2 avec celles fournies par les recommandations de l'AFGC.

Les hypothèses de calcul suivantes sont utilisées :

- Les sections planes restent planes après déformation (hypothèse de Navier-Bernoulli) ;
- Le béton tendu est négligé dans l'équilibre des sections ;
- Pas de glissement entre l'acier et le béton, ni entre le composite et le béton.

2.3.4.1. Notations de l'Eurocode 2

Notation	Définition	Notation	Définition
A_c	Aire d'une section de béton	θ	Angle d'inclinaison des fissures par rapport à la fibre moyenne
A_f	Aire d'une section de composite	ν_f	Coefficient de Poisson du composite
		f_l	Pression de confinement ultime
A_s	Aire d'une section d'acier tendue ou longitudinaux	f_{yd}	Limite d'élasticité de calcul de l'acier de béton armé
A'_s	Aire d'une section d'acier comprimée	f_{yk}	Limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé
A_{sy}	Section d'aciers longitudinaux dans la direction y	h	Epaisseur d'une membrure de béton Petit côté d'un poteau ou épaisseur d'une dalle
A_{sz}	Section d'aciers longitudinaux dans la direction z	h_f	Hauteur totale du composite
$C_{Rd,c}$	Coefficient défini par l'Eurocode 2	k_c	Coefficient de forme de la section
D	Diamètre d'un poteau	k_h	Coefficient de forme du composite
E_{ad}	Module d'élasticité de l'interface composite-béton en traction	l_{anc}	Longueur d'ancrage du composite
$E_{ad,c}$	Module d'élasticité de l'interface composite-béton en compression	l'_{anc}	Longueur de transfert majorée
E_c	Module d'Young du béton	$l_{anc,d}$	Longueur d'ancrage de calcul du composite
E_f	Module d'Young du composite béton	$l_{anc,exp}$	Longueur d'ancrage du composite déduite des essais
E_p	Module de confinement de la section	$l_{anc,th}$	Longueur d'ancrage théorique du composite
E_s	Module d'Young de l'acier	$l_{anc,Vu}$	Longueur d'ancrage du composite choisie pour le calcul à l'effort tranchant
F_{ade}	Effort de traction élastique maximum dans l'interface composite-béton	l_{rec}	Longueur de recouvrement du composite
F_f	Effort normal dans le composite	l_{trans}	Longueur de transfert
$F_{f,ELS}$	Effort repris par le composite à l'ELS (après la zone de transfert)	n	Coefficient d'équivalence acier-béton
$F_{f,ELU}$	Effort repris par le composite à l'ELU	n_f	Coefficient d'équivalence composite-béton
F_s	Effort normal repris par les aciers passifs tendus	n_p	Nombre de plis de composite
F'_s	Effort normal repris par les aciers passifs comprimés	s_f	Espacement entre les bandes de composite
G_{ad}	Module de cisaillement de l'interface composite- béton	s	Espacement entre les cadres transversaux
G_f	Module de cisaillement plan du composite	t_{ad}	Epaisseur de l'interface composite-béton
I	Inertie homogénéisée de la section	t_f	Epaisseur du composite
M_{Rd}	Moment fléchissant	$t_{f,ELU}$	Epaisseur minimale de composite pour résister en flexion à l'ELU
M_{Rdc}	Moment fléchissant repris par le béton	v_{add}	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELS
M_{Rdf}	Moment fléchissant repris par le composite	v_{adud}	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELU
M_{Rds}	Moment fléchissant repris par les aciers passifs tendus	v_c	Taux de cisaillement moyen à l'ELS dans le béton d'enrobage
N_{Ed}	Effort normal appliqué à la section	v_{cu}	Taux de cisaillement moyen à l'ELU dans le béton d'enrobage
N_{Rd}	Effort normal pouvant être repris par un poteau confiné	v_{Ed}	Taux de cisaillement moyen à l'ELU
R	Rayon de courbure de la section	v_{min}	Contrainte définie par l'Eurocode 2
R_f	Résistance maximale à la traction de la section du composite	y	Profondeur de l'axe neutre pour une section calculée vis-à-vis de l'état limite de service
T_g	Température de transition vitreuse	w_f	Largeur de la bande de composite

V_{Ed}	Effort tranchant	Z_f	Bras de levier du composite
$V_{Rd,c}$	Effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armatures d'effort tranchant	Z_s	Bras de levier des aciers passifs
$V_{Rd,f}$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par le composite	$\epsilon_{xy,adu}$	Déformation limite moyenne de cisaillement de l'interface
$V_{Rd,max}$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par l'élément, avant écrasement des bielles de compression	$\epsilon_{xy,ade}$	Déformation limite moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique
$V_{Rd,s}$	Effort tranchant résistant de calcul pouvant être repris par les armatures d'effort tranchant travaillant à la limite d'élasticité	α	Coefficient d'efficacité du confinement
b ou b_w	Epaisseur brute de l'âme d'une poutre Grand côté d'un poteau	α_{ad}	Coefficient de réduction au niveau de l'interface pour tenir compte des effets différés
c_1	Dimension du poteau parallèlement à l'excentricité de la charge	α_f	Coefficient de réduction pour tenir compte de l'effet long terme
c_2	Dimension du poteau perpendiculairement à l'excentricité de la charge	α_v	Rapport des longueurs d'ancrage (cas de l'ancrage partiel)
d	Distance entre le barycentre d'armatures tendues à la fibre extrême la plus comprimée	β	Angle d'inclinaison du composite par rapport à la fibre moyenne
$2d$	Longueur utile du renforcement	ϵ_c	Déformation du béton
d_{eff}	Hauteur utile moyenne	ϵ_{c2}	Déformation du béton atteinte pour la contrainte de compression maximale
d_x	Hauteur utile dans la direction x	ϵ_{cu2}	Déformation ultime du béton en compression
d_y	Hauteur utile dans la direction y	ϵ_f	Déformation du composite
d'	Distance entre les aciers passifs et la fibre tendue	ϵ_{fd}	Déformation limite du composite dans l'équilibre de section prenant en compte la présence d'aciers passifs
f_{ad}	Résistance à la traction de la colle ou de la résine à l'interface composite-béton	ϵ_{fu}	Déformation ultime du composite
f_{cd}	Résistance du béton en compression de calcul	ϵ_{fud}	Déformation ultime de calcul du composite
$f_{cd,c}$	Résistance de calcul du béton confiné	$\Delta\epsilon_f$	Différentiel de déformation au sein du composite
$f_{cdu,c}$	Résistance ultime de calcul du béton confiné	ϵ_s	Déformation des aciers passifs tendus
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton en compression, mesurée sur cylindre à 28 jours	ϵ'_s	Déformation des aciers passifs comprimés
f_{ck}	Contrainte caractéristique à la compression du béton	ϵ_{s0}	Déformation des aciers passifs au moment de la réparation
f_{ctk}	Résistance caractéristique en traction directe du béton	ϵ_{se}	Déformation limite élastique des aciers passifs ($=f_{yd}/E_s$)
$f_{fd,\theta}$	Résistance caractéristique du renfort composite, en fonction de l'orientation	ϵ_{sud}	Déformation ultime de calcul de l'acier
f_{fd}	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELS	ϵ_{suk}	Déformation ultime caractéristique de l'acier
f_{fu}	Contrainte moyenne de traction à la rupture du composite	γ_{ad}	Coefficient partiel de sécurité sur l'adhésif
f_{fud}	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELU	γ_c	Coefficient partiel de sécurité sur le béton
f_{hm}	Résistance moyenne du support en traction directe	γ_f	Coefficient partiel de sécurité sur le composite
ρ_{lz}	Taux de ferrailage longitudinal dans la direction z	γ_s	Coefficient partiel de sécurité sur l'acier
σ_{ad}	Contrainte normale à l'interface	γ_{td}	Coefficient partiel de sécurité sur le béton à l'arrachement
σ_f	Contrainte de traction dans le composite	ψ	Coefficient prenant en compte l'épaisseur de renfort
σ_s	Contrainte normale dans les aciers passifs	χ	Coefficient fonction du type de renfort
τ_{ad}	Contrainte de cisaillement à l'interface	γ_λ	Coefficient de sécurité au flambement

$T_{ad,e}$	Contrainte moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique	Ψ_f	Coefficient de performance
$T_{ad,u}$	Contrainte moyenne ultime de cisaillement à l'interface	ρ_l	Taux de ferrailage longitudinal (=As / Ac)
T_{fdd}	Contrainte de cisaillement interlaminaire du composite	ρ_{ly}	Taux de ferrailage longitudinal dans la direction y

2.3.4.2. Méthode de dimensionnement applicable au procédé BETONTEX Preformed Laminate System

2.3.4.2.1. Préambule

Le présent chapitre reprend les prescriptions de l'Eurocode 2 tout en précisant les dispositions de calcul particulières au cas des structures renforcées par adjonction de lamelles composites.

Ce chapitre traite exclusivement des cas de la flexion simple, composée ou déviée et exclut le cas de la compression simple. Les justifications doivent obligatoirement concerner l'état de limite ultime et l'état limite de service.

Un diagnostic préalable de l'état de la structure à renforcer devra être systématiquement réalisé.

2.3.4.2.2. Diagnostic préalable

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

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

Avant la mise en œuvre du procédé, la résistance moyenne à la traction du support béton doit être systématiquement vérifiée par des essais de pastillage réalisés conformément aux recommandations de l'AFGC (2011), §1.12.

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. Cette vérification consiste à s'assurer que la contrainte de cisaillement à l'interface composite-béton n'excède pas la valeur de la contrainte limite de cisaillement. Cette valeur limite s'appuie dans tous les cas sur des essais de pastillage à effectuer in situ sur le support après préparation, ragréage le cas échéant, dans l'état dans lequel il est destiné à recevoir le renforcement. La valeur de la contrainte de cisaillement limite à retenir pour le dimensionnement est calculée de la manière suivante, à partir de la résistance caractéristique f_{tk} obtenue par les essais de pastillage :

A l'ELS : $\bar{\tau} = \min(1,5 \text{ MPa}; \frac{f_{tk}}{2})$

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

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

2.3.4.2.4. Vérification aux Etats Limites Ultimes (ELU)

Les hypothèses ci-après supposent que les aciers passifs ou de précontrainte sont totalement pris en compte, ce qui est généralement le cas pour les renforcements, mais pas nécessairement pour les réparations.

Les sections et les caractéristiques des armatures et du béton seront déterminées après diagnostic de l'ouvrage.

• Principes et hypothèses de calcul :

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

Les hypothèses de calcul ci-dessous suivent les indications fournies dans le document AFGC de 2011 :

- conservation de la planéité des sections droites jusqu'à rupture, de manière que le diagramme des déformations normales soit linéaire;
- aucun glissement relatif entre les armatures métalliques ou composites et le béton (sauf dans le cas d'une précompression 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 armatures lentes et de précompression et du composite considéré sont ceux du chapitre 2.2 de l'AFGC;
- les déformations des sections sont limitées
 - 0,35 % déformation ultime du béton;
 - 4,5 % allongement unitaire de l'acier;
 - 2,0 % allongement des aciers de précontrainte
 - $\epsilon_{fud} = \min\left\{\frac{f_{fud}}{E_f}; 0,85\%\right\}$ déformation ultime du composite
- On peut supposer concentré dans le barycentre un groupe de barres ou une série de composites adjacents, à condition que le résultat par rapport à leur position effective ne fasse pas varier les valeurs de déformation des composants de plus de 5 %.
- Tous les chargements sont considérés comme des agents.

Le diagramme des déformations limites pour la section armée est présenté, dans laquelle l'application du renforcement est prévue. Pour le béton, un diagramme des tensions parabole rectangle ou, en alternative, simplifié à rectangle est adopté.

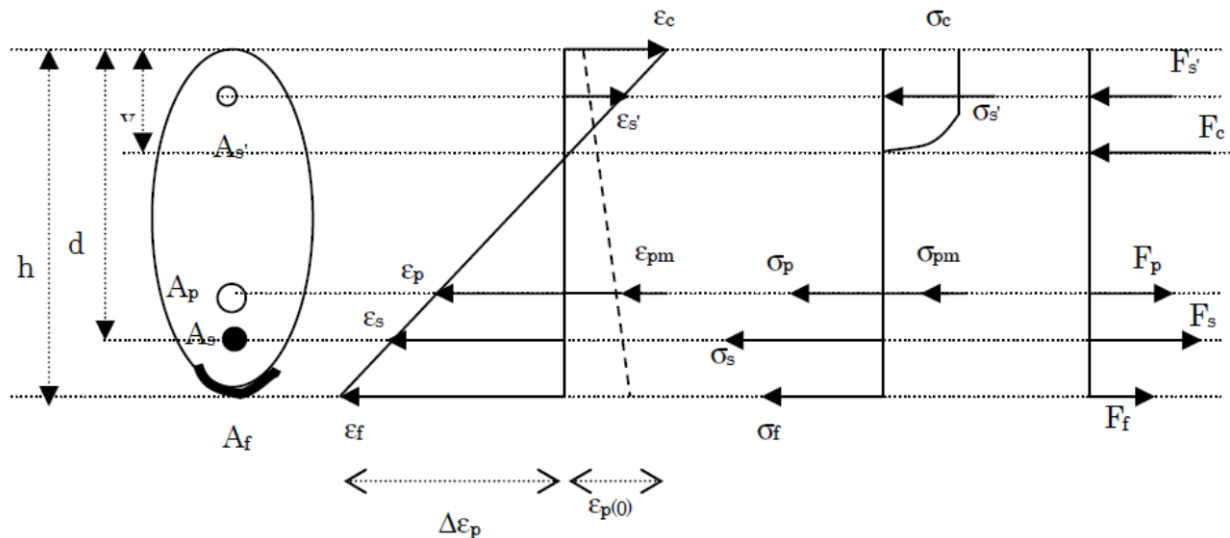


Figure 5 - Diagramme des déformations limites d'une section

Les champs de rupture considérés sont :

- Sommet A : atteinte de la limite de déformation de l'armature lente ou de l'acier de précompression, au-delà de la décompression du béton;
- Sommet B : limite de déformation ultime à compression du béton pour flexion ;
- Sommet C : limite de déformation ultime à compression du béton à compression centrée seule ;
- Sommet D : limite de déformation du composite.

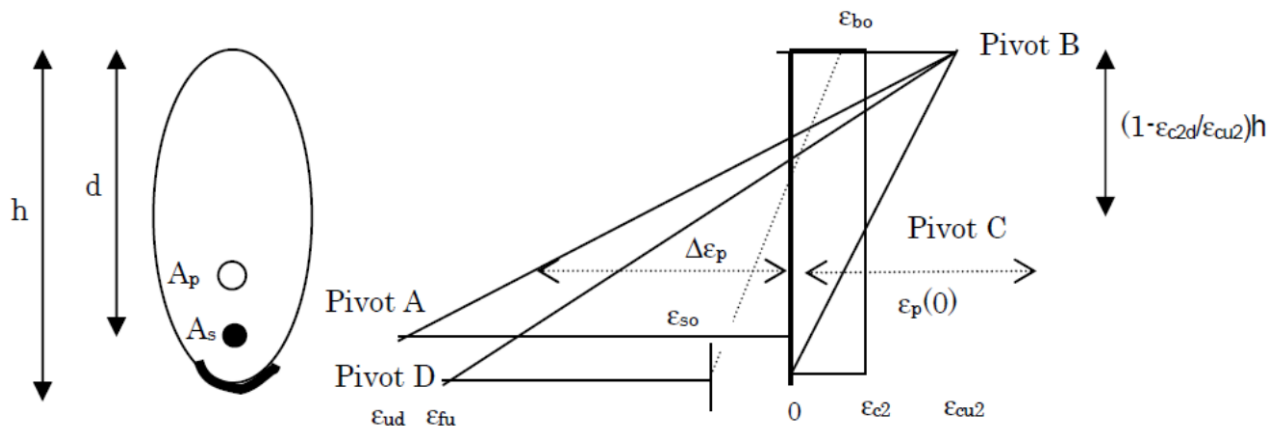


Figure 6 - Diagramme des champs de rupture

Les déformations indiquées dans les graphiques correspondent à :

- ϵ_{b0} = déformation du béton à l'état actuel, dans les conditions de charge au moment de l'application du renforcement ;
- ϵ_{s0} = déformation de l'acier à l'état actuel, dans les conditions de charge au moment de l'application du renforcement ;
- ϵ_{fud} = déformation ultime du composite pour le calcul ;
- ϵ_{ud} = déformation ultime de l'acier ;
- ϵ_{c2} = déformation atteinte pour la compression maximale du béton à projet ;
- ϵ_{cu2} = déformation ultime à compression du béton.

Exemple : calcul d'une section rectangulaire en béton armé sans armature à compression en flexion simple (On considère, en première approximation, que la déformation du composite est supérieure de 10 % par rapport à celle des aciers pour une condition de revêtement classique)

1er cas : Sommet A ou B

$$1.10 \cdot (10\% - \epsilon_{s0}) < \epsilon_{fud}$$

- Moment ultime section au sommet B (diagramme de déformation AB) – rupture côté béton

$$M_{Rdc} = 0.8y \cdot f_{cd} \cdot b \cdot (d - 0.4y) \quad \text{avec } y = 0.259d$$

- Moment ultime section au sommet A (droite de déformation passant par le point A) – rupture côté acier

- Moment repris par les armatures déformées

$$M_{Rds} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z_s \quad \text{avec } z_s \approx 0.9d$$

Moment repris par le composite

$$M_{Rdf} = A_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{fd} \cdot z_f \quad \text{avec } z_f \approx d$$

- Moment ultime de la section renforcée

$$M_{Rd} = \min\{M_{Rdc}; M_{Rds} + M_{Rdf}\}$$

2ème cas : Sommet B ou D : acier déformé

$$\epsilon_{se} = \frac{f_{yk}/\gamma_s}{E_s} = 2.17\text{‰} < \epsilon_{fud} < 1.10 \cdot (10\text{‰} - \epsilon_{s0})$$

Où :

$$\text{Moment repris par les armatures tendues : } M_{Rds} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z_s$$

$$\text{Moment repris par le composite : } M_{Rdf} = A_s \cdot E_f \cdot \epsilon_{fud} \cdot z_f$$

$$\text{Moment ultime de la section renforcée : } M_{Rd} = \min\{M_{Rdc}; M_{Rds} + M_{Rdf}\}$$

3ème cas : Sommet B ou D : acier non déformé

$$\epsilon_s = \epsilon_{s0} + 0.91\epsilon_{fud} < \epsilon_{se} = \frac{f_{yk}/\gamma_s}{E_s}$$

Où :

$$\text{Moment repris par les armatures tendues : } M_{Rds} = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s \cdot z_s$$

$$\text{Moment repris par le composite : } M_{Rdf} = A_s \cdot E_f \cdot \epsilon_{fud} \cdot z_f$$

$$\text{Moment ultime de la section renforcée : } M_{Rd} = \min\{M_{Rdc}; M_{Rds} + M_{Rdf}\}$$

2.3.4.2.5. Vérification à l'Etat Limite de Service (ELS)

Les hypothèses suivantes supposent que les aciers passifs ou de précontrainte sont totalement pris en compte.

Les sections et les caractéristiques des armatures et du béton seront déterminées lors du diagnostic de l'ouvrage.

Les vérifications à effectuer portent sur :

- Une limitation de la contrainte de compression du béton sous combinaison quasi-permanente à : $\sigma_{c,lim} = 0.45f_{ck}$
- Une limitation de la contrainte de compression du béton sous combinaison caractéristique à : $\sigma_{c,lim} = 0.6f_{ck}$
- Une limitation de la contrainte de traction des aciers passifs à : $\sigma_{s,lim} = 0.8f_{yk}$
- Une limitation de la contrainte de traction des aciers de précontrainte à : $\sigma_{pm} = 0.8f_{pk}$
- une limitation de la contrainte de traction dans le composite à : $\sigma_{f,lim} = \min\{f_{fd}; 0.9\sigma_{s,lim}\}$

Les fissures doivent être limitées de manière à ne pas compromettre le bon fonctionnement ou la durabilité de la structure, ni à rendre son apparence inacceptable. Selon l'Eurocode 2, le contrôle des fissures se fait par un calcul de l'ouverture des fissures et l'installation d'une armature minimale en zone tendue sous combinaison caractéristique. Le calcul de l'ouverture des fissures permet, en particulier, d'éviter la pénétration d'agents agressifs.

Si le renforcement en composite est appliqué sur toute la surface de la structure fissurée, la pénétration des agents agressifs est inhibée. La vérification à l'ELS se limite donc à contrôler les tensions limites, citées précédemment, pour les matériaux en jeu. Si le renforcement en composite ne couvre pas toute la surface, la question du contrôle de l'ouverture des fissures devra être considérée. En ce qui concerne le renforcement minimal, le composite utilisé doit compenser le déficit éventuel observé.

Diagramme des déformations limites de la section

Dans le cas où la position de l'axe neutre ne varie pas, l'équilibre de la section se traduit par le diagramme suivant :

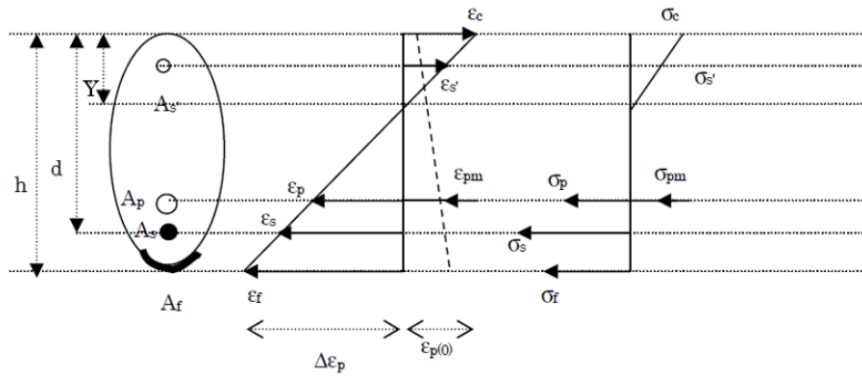


Figure 7 - Diagramme des déformations et des contraintes à l'ELS

Considérons l'état avant renforcement (σ_1, M_1) et l'état après renforcement (σ_2, M_2). Le moment total appliqué à une section vaut : $M = M_1 + M_2$

Avec M_1 : moment de service avant renforcement et M_2 : moment de service supplémentaire à reprendre par le composite.

Les vérifications sous les torseurs de charges existantes au cours du renforcement $\{N_1; M_1\}$ et des charges supplémentaires apportées après renforcement $\{N_2; M_2\}$ s'écrivent :

$$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} \leq \sigma_{slim}$$

$$\sigma_c = \sigma_{c1} + \sigma_{c2} \leq \sigma_{clim}$$

$$\sigma_f \leq \sigma_{flim}$$

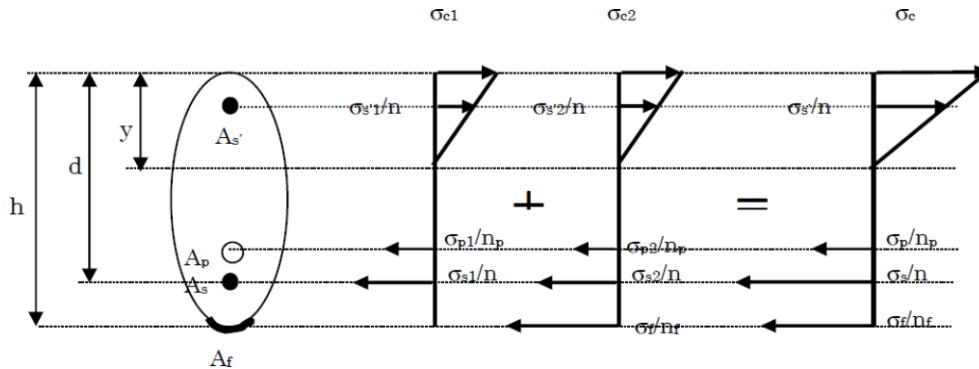


Figure 8 - Diagramme des déformations et des contraintes à l'ELS avec superposition des états

$$n = \frac{E_s}{E_c} \approx 15, \quad n_p = \frac{E_p}{E_c} \cdot e_t, \quad n_f = \frac{E_f}{E_s} \cdot n$$

n_f : déclaré par le fabricant

$n_f=12.00$ pour Betontex FB-G14L-HT__

$n_f=15.43$ pour Betontex FB-G14L-HM__

$n_f=17.79$ pour Betontex FB-G14L-HHM__

[le coefficient ci-dessus est obtenu à partir de $n=15$, qui correspond à un rapport habituel entre les charges permanentes et d'exploitation. Dans le cas des matériaux composites utilisés sur une structure existante, la proportion de charges permanentes absorbée par le matériau est généralement plus basse.]

Exemple : cas de la flexion simple - section rectangulaire en béton armé renforcée : calcul des caractéristiques mécaniques et des contraintes après renforcement.

Position de l'axe neutre :

$$Y = \frac{(-A + \sqrt{A^2 + 2bB})}{b}$$

Avec $A=nA_s'+nA_s+n_fA_f$

$B=n_d'A_s'+n_dA_s+n_fhA_f$

Y_1 : position de l'axe neutre de la section non renforcée

Y_2 : position de l'axe neutre de la section renforcée

L'inertie de la section est donnée par :

$$I = bY^3/3 + nAs'(Y-d')^2 + nAs(d-Y)^2 + nAf(h-Y)^2$$

Avec : I_1 : inertie de la section non renforcée

I_2 : inertie de la section renforcée

Les contraintes finales dans les différents matériaux sont alors obtenues par les expressions suivantes :

$$\sigma_c = \frac{M_1 \cdot Y_1}{I_1} + \frac{(M_{ser} - M_1) \cdot Y_2}{I_2}$$

$$\sigma_s = \frac{n \cdot M_1 \cdot (d - Y)_1}{I_1} + \frac{n \cdot (M_{ser} - M_1) \cdot (d - Y)_2}{I_2}$$

$$\sigma_f = n_f \frac{(M_{ser} - M_1) \cdot (d - Y)_2}{I_2}$$

2.3.4.2.6. Espacement entre les renforts à la flexion

Les espacements entre les renforts à la flexion sont calculés conformément au §9.3.1.1(3) de la norme NF EN 1992-2 en précisant notamment les définitions des hauteurs efficaces.

2.3.4.2.7. Vérification du cisaillement de glissement en flexion

On vérifiera que le cisaillement à l'interface entre le béton et la colle est acceptable.

Il peut être calculé par :

$$V_{Ed} = \left(\frac{V_{Ed}}{w_f z} \right) \cdot \left(\frac{F_f}{F_f + F_s} \right)$$

avec $z \approx 0,9d$ à défaut d'une valeur exacte

Dans cette expression, F_f et F_s sont respectivement les efforts à l'état limite ultime repris dans le composite et dans les aciers passifs longitudinaux.

On vérifiera : (ELU) $V_{Ed} \leq V_{add}$

2.3.4.2.8. Vérification du délaminage à l'extrémité du renforcement – rupture dans le béton à l'interface béton-composite

Ce critère de rupture fait référence à celui proposé par les recommandations provisoires de l'AFGC (Février 2011).

Vérification à l'état limite de service ELS

On calcule l'effort repris dans le composite à l'état limite de service dans la section située juste après la zone de transfert (Σ_1 sur la figure ci-après). Soit $F_{f,ELS}$ la valeur de cet effort.

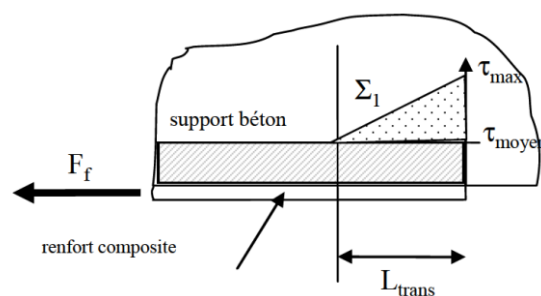


Figure 9 - Répartition triangulaire de la contrainte de cisaillement

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

$$v_c = \frac{F_{f,ELS}}{w_f l_{anc,d}} \leq v_{adud} \quad (ELS)$$

La longueur d'ancrage $l_{anc,d}$ est de 200mm.

Vérification à l'état limite ultime ELU

On détermine l'épaisseur minimale de renforcement nécessaire pour assurer la résistance en flexion à l'État Limite Ultime de la section Σ_1 .

Soit $t_{f,ELU}$ cette épaisseur et $F_{f,ELU}$ l'effort ultime correspondant dans le renforcement :

$F_{f,ELU} = E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot w_f \cdot t_{f,ELU}$ si le pivot est D

On vérifiera que le cisaillement maximal correspondant à l'introduction de l'effort $F_{f,ELU}$ sur la longueur de transfert est inférieur au cisaillement admissible à l'ELU, en considérant une répartition moyenne de la contrainte de cisaillement.

$$v_{cu} = \frac{F_{f,ELU}}{w_f \cdot l_{anc,d}} \leq v_{adud} \quad (ELU)$$

La longueur d'ancrage $l_{anc,d}$ est de 200mm.

2.3.5. Calcul de renforcement en flexion simple au BAEL91 révisé 99

2.3.5.1. Notations

Notation	Définition	Notation	Définition
B_t	Aire d'une section de béton	f_e	Limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé
A_f	Aire d'une section de composite	h	Epaisseur d'une membrure de béton ou épaisseur d'une dalle
A_p	Aire d'une section d'acier de précontrainte	h_f	Hauteur totale pour le calcul du composite
A_s	Aire d'une section d'acier tendue ou longitudinaux	l_{anc}	Longueur d'ancrage du composite
A_s'	Aire d'une section d'acier comprimée	$l_{anc,d}$	Longueur d'ancrage de calcul du composite
E_b	Module d'Young du béton	n	Coefficient d'équivalence acier-béton
E_f	Module d'Young du composite béton	n_f	Coefficient d'équivalence composite-béton
E_p	Module de confinement de la section Module d'Young de l'acier de précontrainte	V_{add}	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELS
E_s	Module d'Young de l'acier	V_{adud}	Contrainte limite de calcul de cisaillement à l'interface à l'ELU
$F_{f\ ELS}$	Effort repris par le composite à l'ELS (après la zone de transfert)	w_f	Largeur de la bande de composite
F_{fu}	Effort repris par le composite à l'ELU	z_f	Bras de levier du composite
F_s	Effort normal repris par les aciers passifs tendus	z_s	Bras de levier des aciers passifs
F'_s	Effort normal repris par les aciers passifs comprimés	ϵ_c	Déformation du béton
F_{fu}	Force ultime reprise par le béton	F_{fu}	Force ultime reprise par le béton
I_1	Inertie de la section homogénéisée non renforcée	ϵ_f	Déformation du composite
I_2	Inertie de la section homogénéisée renforcée	ϵ_{fd}	Déformation limite du composite dans l'équilibre de section prenant en compte la présence d'aciers passifs
M_u	Moment fléchissant aux ELU	ϵ_{fu}	Déformation ultime du composite
M_{bu}	Moment fléchissant repris par le béton	ϵ_{fud}	Déformation ultime de calcul du composite
M_f	Moment fléchissant repris par le composite	$\Delta\epsilon_f$	Différentiel de déformation au sein du composite
M_s	Moment fléchissant repris par les aciers passifs tendus	ϵ_s	Déformation des aciers passifs tendus
M_1	Moment fléchissant en service avant renforcement	ϵ'_s	Déformation des aciers passifs comprimés
M_{ser}	Moment fléchissant en service après renforcement	ϵ_{s0}	Déformation des aciers passifs au moment de la réparation
V_u	Tranchant ultime	ϵ_s	Déformation limite élastique des aciers passifs ($=f_e/E_s$)
N	Effort normal appliqué à la section	ϵ_{su}	Déformation ultime de calcul de l'acier
b	Largeur de l'élément considéré	γ_p	Coefficient partiel de sécurité sur l'acier de précontrainte
d	Distance entre le barycentre d'armatures tendues à la fibre extrême la plus comprimée	γ_c	Coefficient partiel de sécurité sur le béton
d'	Distance entre les aciers passifs et la fibre tendue	γ_f	Coefficient partiel de sécurité sur le composite
f_{cj}	Résistance caractéristique du béton en compression, mesurée sur cylindre à 28 jours	γ_s	Coefficient partiel de sécurité sur l'acier
f_{tj}	Résistance caractéristique en traction directe du béton	f_{su}	Résistance de calcul en traction des aciers passifs
f_{fd}	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELS	τ	Contrainte limite ultime de cisaillement
f_{fu}	Contrainte moyenne de traction à la rupture du composite	σ_f	Contrainte de traction dans le composite
f_{fud}	Contrainte limite de traction du composite pour calcul à l'ELU	σ_{st}	Contrainte de traction dans les aciers passifs
f_{pd}	Résistance de calcul en traction des aciers de précontrainte	σ_p	Contrainte normale dans les aciers actifs
f_{pk}	Résistance caractéristique en traction des aciers de précontrainte	ν_f	Coefficient de Poisson du composite
$f_{p0.1k}$	Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0.1% des aciers de précontrainte	t_f	Epaisseur du composite

σ_{ad}	Contrainte normale à l'interface	$t_{f,ELU}$	Epaisseur minimale de composite pour résister en flexion à l'ELU
---------------	----------------------------------	-------------	--

2.3.5.2. Calcul en flexion

2.3.5.2.1. Vérification à l'Etat Limite Ultime (ELU)

Le dimensionnement étudié est celui du renforcement des structures en béton armé et précontraint. Le dimensionnement doit être réalisé par un bureau d'études techniques spécialisé, extérieur à l'entreprise ou intégré à celle-ci.

Cependant, pour l'accompagnement des bureaux d'études, Fibre Net S.p.A. met à disposition ses fichiers d'aide aux calculs et son service

technique. La responsabilité de Fibre Net S.p.A. ne peut être engagée sur les hypothèses de calcul saisies.

Une section renforcée se comporte de la même manière qu'une section de béton armé ou précontraint classique.

Le composite se comporte en armature externe. Pour les ouvrages antérieurs à 2007 les dimensionnement et vérifications se feront sous les règles du BAEL 91 révisé 99.

Pour cela, on complète les règles du BAEL 91 révisé 99 avec celles fournies par les recommandations de l'AFGC.

Les hypothèses de calcul du BAEL 91 révisé 99 et du BPEL 91 sont les suivantes :

- Les sections planes restent planes après déformation (hypothèse de Navier-Bernoulli);
- Le béton tendu est négligé dans l'équilibre des sections;
- Pas de glissement entre l'acier et le béton, ni entre le composite et le béton.

Béton : Contrainte limite de compression du béton :

$$f_{bu} = \frac{0.85 \cdot f_{c28}}{\theta \cdot \gamma_b}$$

Où : $\theta=1$

$\gamma_b=1.5$

Aciers : Contrainte limite de traction de l'acier à la rupture :

$$f_{su} = \frac{f_e}{\gamma_s}$$

Où : $\gamma_s=1.15$

Composites : Contrainte limite de traction des composites à la rupture :

$$f_{fud}$$

Expression du moment repris par le composite :

$$M_{cu} = f_{fud} \cdot (d - 0.4 \cdot y_u)$$

L'expression du moment aux ELU :

$$M_u = M_{bu} = 0.8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} \cdot (d - 0.4 \cdot y_u)$$

Avec : M_u calculé en tenant compte de la pondération des charges dictées dans le BAEL : $S = 1.35.G + 1.5.Q$

On en déduit la position de l'axe neutre y_u

L'élément est en équilibre : la force reprise par le béton est égale à la force aciers + forces composites :

$$F_{bu} = F_{su} + F_{fu}$$

Donc l'effort repris par les composites :

$$F_{fu} = 0.8 \cdot b \cdot y_u \cdot F_{bu} - A_s \cdot f_{su}$$

D'où la section nécessaire de composites pour équilibrer :

$$A_f > \frac{F_{fu}}{f_{fud}}$$

Avec : A_f en mm^2

F_{fu} en N

f_{fud} en MPa

2.3.5.2.2. Vérification à l'Etat Limite de Service (ELS)

Dans les mêmes conditions que précédemment, dans le cadre du BAEL91 révisé 99 (art.A.4.5,3) :

σ_{st} : Fissuration peu préjudiciable (plat collé sur toute la longueur du porteur) : $\sigma_s = f_e$

Fissuration préjudiciable (plat collé selon épure d'arrêt de composite) :

$$\xi = \min\left\{\frac{2}{3}f; \max(0.5f; 110\sqrt{\eta} \cdot f_{tj})\right\} \text{ (art. A.4.5,33 du BAEL)}$$

Fissuration très préjudiciable ξ se reporter à l'art.A.4.5,34 du BAEL

σ_b : $\sigma_b = 0.6 \cdot f_{c28}$ (combinaison rare)

$\sigma_{f,lim}$: $\sigma_{f,lim} = \min\{f_{fd}; 0.9\sigma_{s,t}\}$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \approx 15; \quad n_p = \frac{E_p}{E_c} \cdot e_t \quad n_f = \frac{E_f}{E_s} \cdot n$$

n_f : déclaré par le fabricant

$n_f=12.00$ pour Betontex FB-G14L-HT__

$n_f=15.43$ pour Betontex FB-G14L-HT__

$n_f=17.79$ pour Betontex FB-G14L-HT__

[le coefficient ci-dessus est obtenu à partir de $n=15$, qui correspond à un rapport habituel entre les charges permanentes et d'exploitation. Dans le cas des matériaux composites utilisés sur une structure existante, la proportion de charges permanentes absorbée par le matériau est généralement plus basse.]

Exemple : cas de la flexion simple – section rectangulaire en béton armé renforcée : calcul des caractéristiques mécaniques et des contraintes après renforcement.

Position de l'axe neutre :

$$Y = \frac{(-A + \sqrt{A^2 + 2bB})}{b}$$

Avec $A=nA_s' + nA_s + n_f A_f$

$B=n_d'A_s' + n_d A_s + n_f h A_f$

Y_1 : position de l'axe neutre de la section non renforcée

Y_2 : position de l'axe neutre de la section renforcée

L'inertie de la section est donnée par :

$$I = bY_1^3/3 + nA_s'(Y-d)^2 + nA_s(d-Y)^2 + n_f A_f(h-Y)^2$$

Avec : I_1 : inertie de la section non renforcée

I_2 : inertie de la section renforcée

Les contraintes finales dans les différents matériaux sont alors obtenues par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{M_1 \cdot Y_1}{I_1} + \frac{(M_{ser} - M_1) \cdot Y_2}{I_2} \\ \sigma_s &= \frac{n \cdot M_1 \cdot (d - Y_1)}{I_1} + \frac{n \cdot (M_{ser} - M_1) \cdot (d - Y_2)}{I_2} \\ \sigma_f &= n_f \frac{(M_{ser} - M_1) \cdot (d - Y_2)}{I_2} \end{aligned}$$

2.3.5.2.3. Vérification du cisaillement de glissement en flexion

On vérifiera que le cisaillement à l'interface entre le béton et la colle est acceptable.

Il peut être calculé par :

$$\tau_u = \left(\frac{V_u}{b_f \cdot 0.9 \cdot d} \right) \cdot \left(\frac{F_f}{F_f + F_s} \right) \leq \bar{\tau}$$

Avec : V_u : effort tranchant ultime.

F_f : effort de traction dans le composite

F_s : effort de traction dans les armatures

b_f : largeur du composite

d : hauteur utile de la section

$$\bar{\tau} = \min(2MPa; \frac{f_{tj}}{1.5})$$

Dans cette expression, F_f et F_s sont respectivement les efforts à l'état limite ultime repris dans le composite et dans les aciers passifs longitudinaux.

On vérifiera : $\tau_u \leq \bar{\tau}$

2.3.5.2.4. Vérification du délaminage à l'extrémité du renforcement – rupture dans le béton à l'interface béton-composite

On calcule l'effort repris dans le composite à l'état limite de service dans la section située juste après la zone de transfert (Σ_1 sur la figure ci-après). Soit $F_{f,ELS}$ la valeur de cet effort.

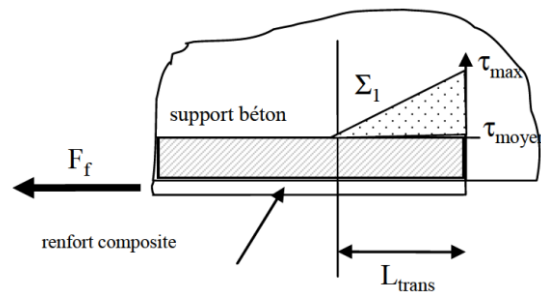


Figure 12 - Répartition triangulaire de la contrainte de cisaillement

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

$$\tau_{\max ELS} = \frac{F_{f,ELS}}{b_f \cdot l_{anc,d}} \leq \bar{\tau}_{ELS}$$

Avec : b_f : largeur du composite

$l_{anc,d}$: 200 mm

$\bar{\tau}_{ELS} = \min(1.5MPa; \frac{f_{tj}}{2})$ où f_{tj} est la valeur caractéristique à la traction issue des essais de pastillage du support.

2.3.5.2.5. Vérification à l'ELU

On détermine l'épaisseur minimale de renforcement nécessaire pour assurer la résistance en flexion à l'État Limite Ultime de la section Σ_1 .

Soit $t_{f,ELU}$ cette épaisseur et $F_{f,ELU}$ l'effort ultime correspondant dans le renforcement :

$$F_{f,ELU} = E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot w_f \cdot t_{f,ELU} \quad \text{si le pivot est D}$$

On vérifiera que le cisaillement maximal correspondant à l'introduction de l'effort $F_{f,ELU}$ sur la longueur de transfert est inférieur au cisaillement admissible à l'ELU, en considérant une répartition moyenne de la contrainte de cisaillement.

$$\sigma_{ELU} = \frac{F_{f,ELU}}{b_f \cdot l_{anc,d}} \leq \bar{\sigma}_u$$

Avec : b_f : largeur du composite

$l_{anc,d}$: 200

$\bar{\sigma}_u = \min(2MPa; \frac{f_{tj}}{1.5})$ où f_{tj} est la valeur caractéristique à la traction issue des essais de pastillage du support.

Calcul de renforcement des structures en béton précontraint suivant le BPEL 91

Le calcul des structures en béton précontraint renforcées par le procédé du renforcement est mené suivant les règles du BPEL. Le renforcement des éléments de structures en béton précontraint est visé uniquement au BPEL. Ce dernier définit 3 classes de vérification en ELS, classées par ordre de sévérité décroissante, fonction de l'état de fissuration envisagé, du type d'ouvrage, de l'environnement.

- Classe I : concerne des ouvrages particuliers ou exceptionnels (parois étanches, réservoirs avec fluide dangereux, pièces sollicitées en fatigue, ...). Le béton est entièrement comprimé en tout point de la section : aucune contrainte de traction n'est admise.
- Classe II : destinée aux ouvrages exposés à une ambiance agressive et à ceux qui comportent des joints ; elle se caractérise par une contrainte de traction admissible.
- Classe III : intéresse essentiellement les éléments en atmosphère peu agressive (bâtiments courants).

2.3.5.2.6. Vérification de la flexion à l'ELS

Il faut superposer les états de contraintes avant et après renforcement (augmentation des charges)

En classe II (BPEL Art 6.1,23)

La vérification en classe II s'applique aux éléments en béton précontraint à renforcer, dimensionnés à l'origine en classe I.

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

En service, le calcul des contraintes est effectué sur la section non fissurée, en vérifiant les contraintes données dans le BPEL :

- Sous combinaisons rares : f_{tj} dans la section d'enrobage; $1,5 f_{tj}$ ailleurs
- Sous combinaisons fréquentes : 0 dans la section d'enrobage

En classe III (BPEL Art 6.1,24)

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

- État 1 : structure à l'état initial avant renforcement
- État 2 : application du chargement à la structure renforcée
- État 3 : structure à l'état final correspondant à la superposition des états précédents (superposition des états de contraintes)

CLASSE	Limites	Combinaisons		
		Rare	Fréquente	Quasi-permanente
II	Compression du béton	$0.6 f_{c28}$	$0.6 f_{c28}$	$0.5 f_{c28}$
	Traction – Zone d'enrobage	f_{tj}	0	-
	Traction - Hors zone d'enrobage	$1.5.f_{tj}$	-	-
	Traction des Aciers	-	-	-
III	Compression du béton	$0.6 f_{c28}$	$0.6 f_{c28}$	$0.5 f_{c28}$
	Traction – Zone d'enrobage	f_{tj}	-	≥ 0
	Traction - Hors zone d'enrobage	f_{tj}	-	-
	Surtension des aciers de précontrainte	Pré-tension : $\Delta\sigma_p = \text{Min}\{0.10 f_{prg}; 150\eta p\}$ Post-tension : $0.10 \cdot F_{prg}$	100 MPa	--
	Traction des Aciers passifs	Peu préjudiciable f_e Préjudiciable : $\Delta\sigma_s = \text{Min}\{2/3 \cdot f_e; \text{Max}(0.5.f_e; 110 \sqrt{(\eta \cdot f_{tj})})\}$	0.35 f_e ou voir DPM	

Contrainte limite de traction dans le composite : $\sigma_f < \sigma_{flim}$ avec $\sigma_{flim} = 0,9 \cdot \sigma_{slim}$

Section minimale de renfort :

Dans le cas des éléments précontraints par pré-tension, le calcul se fait sur la base de l'article 6.1.32 du BPEL. La section minimale de renfort nécessaire dans les zones tendues est donnée par la formule :

$$A_f = \left(\frac{B_t}{1000} \right) \cdot \left[\frac{N \cdot b_t}{\sigma_{flim}} - A_s - A_p \right] \cdot \frac{f_{tj}}{\sigma_{bt}}$$

Avec :

b_t : aire de la partie du béton tendu

σ_{flim} : contrainte de traction admissible à l'ELS

N_{bt} : résultante des contraintes de traction

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

Ces quantités sont calculées sur la section non fissurée, en classe II et en classe III.

Avec :

A_s : section des armatures passives

A_p : section des armatures de précontrainte prétendues

La distance au parement en traction devra être inférieure à 5 cm ou les 2/3 de la hauteur du béton tendu.

2.3.5.2.7. Vérification de la flexion à l'ELU

Effort dans le béton : $F_b = 0,8 \cdot b \cdot Y_u \cdot f_{bu}$

Effort dans l'acier passif : $F_s = A_s \cdot f_{su}$

Effort dans l'acier actif : $F_p = A_p E_p \Delta \frac{\varepsilon_p}{\gamma_p}$ $\gamma_p = 1,5$

Effort dans le renfort : $F_f = A_f E_f \frac{\varepsilon_f}{\gamma_f}$ $\gamma_f = 2$

Vérifier que $M_{résist} < M_{ELU}$

2.4. Mise en œuvre

2.4.1. Travaux préparatoires

2.4.1.1. Préambule

Il est préconisé de réaliser au préalable un diagnostic du support pour évaluer les éventuels défauts internes du béton (carbonatation, corrosion des aciers, taux de chlorure élevé...) avec le concours d'un organisme compétent.

Les dégradations superficielles du béton doivent être réparées suivant la norme NFP 95-101, à l'aide des mortiers de réparation listés dans le paragraphe 2.2.3.

Il est souhaitable, en outre, de « sonder » les anciennes réparations et de les éliminer en cas de doute, puis de les réparer selon les exigences de la norme NFP 95-101 précitée.

Les traces éventuelles d'huiles, graisses, sels seront éliminées, tout comme les anciens revêtements (peintures, enduits).

Les arrivées d'eau avant et pendant la mise en œuvre seront éliminées.

2.4.1.2. Etat de surface

La surface du béton doit être lisse et continue. Les opérations suivantes doivent être effectuées pour y parvenir :

Assainir le béton par élimination des corps étrangers et zones désagrégées, piquer la surface des cavités, couper les excroissances et annuler par meulage les balèvres.

Obturer toutes les cavités à l'aide d'un mortier de réparation décrit dans le paragraphe 2.2.3.

Injecter les fissures d'ouverture supérieures à 0,3 mm à l'aide Betontex RC30/3 suivant la norme NFP 95-103.

Les arêtes seront meulées pour former un chanfrein ayant un rayon de courbure au moins égal à 2 cm, excepté pour les poteaux où le rayon de courbure doit être au moins égal à 35 mm.

La surface du béton doit présenter au minimum les tolérances de formes d'un parement simple suivant l'article 52.2.1 du fascicule N°65-A soit 8mm sous la règle de 2m, ou 3mm sous le réglet de 20cm.

Si cela n'est pas le cas, il faut reprofiler le support par l'utilisation d'un mortier de réparation décrit dans le paragraphe 2.2.3 ou au moyen de résine époxydique Betontex RC30/3.

La surface à coller ne comportera pas plus de 20 % de sa surface ragrée.

2.4.1.3. Préparation du support béton

Le support béton fera obligatoirement l'objet d'une application du primaire d'accrochage RC01 préalablement à la mise en place du renforcement collé.

2.4.2. Conditions climatiques et d'environnement lors de la mise en œuvre

2.4.2.1. Conditions climatiques

Temps calme afin d'éviter que le vent amène dans les résines des poussières, feuilles, détritrus... Les surfaces de collage doivent être à l'abri de la pluie et de tout ruissellement.

La température minimale du support est de +5°C.

La température maximale du support est de +30°C (au-delà, la Durée Pratique d'Utilisation devient trop courte).

Après avoir effectué l'intervention maintenir la surface traitée à une température supérieure à + 5°C.

Protéger contre la pluie pendant 24 heures minimum si la température ne descend pas en dessous de +15°C, et pendant au moins 3 jours si la température reste inférieure à +15°C.

Pour une hygrométrie inférieure à 80 %, l'entreprise vérifiera chaque jour, en début de journée, que la température du support est supérieure de +3°C à celle du point de rosée, pour éviter tout risque de condensation sur le support (voir diagramme de Mollier en annexe).

Pour une hygrométrie supérieure à 80 %, l'entreprise vérifiera toutes les heures que la température du support est supérieure de +3°C à celle du point de rosée, pour éviter tout risque de condensation sur le support (voir diagramme de Mollier ou tableau des valeurs en annexe).

La température de l'air pour la mise en œuvre des procédés doit être comprise entre +5°C et +30°C.

2.4.2.2. Stockage des matériaux

Les produits intervenant dans les procédés, **BETONTEX Preformed Laminate Systems** doivent être stockés dans un local sec et couvert à une température minimum de +5°C.

2.4.2.3. Température et hygrométrie de mise en œuvre.

La température de l'air pour la mise en œuvre des procédés doit être comprise entre +5°C et +30°C.

L'humidité relative de l'air devra être inférieure à 95% et le taux d'humidité résiduelle du support ne devra pas excéder 5%.

2.4.3. Mise en œuvre des procédés

2.4.3.1. Entreprises applicatrices

La mise en œuvre du procédé **BETONTEX Preformed Laminate Systems** nécessite une compétence particulière de l'entreprise applicatrice qui implique un bon niveau de connaissance de ces procédés ainsi qu'un bon niveau de formation de la main d'œuvre et de son encadrement.

De ce fait, afin d'assurer une mise en œuvre qui soit conforme aux exigences décrites par le présent dossier technique, les entreprises devront avoir reçu une formation, ou à minima un accompagnement lors du démarrage chantier par service technique Fibre Net S.p.A. Fibre Net S.p.A. assure son assistance en français sur les chantiers aux entreprises qui en font la demande.

2.4.3.2. Préparation du BETONTEX Preformed Laminate Systems

Le produit est fourni en rouleaux à découper avec une lame diamantée sur place, selon les besoins. Un film est placé sur les deux faces de la lamelle pour protéger le produit des salissures lors de la manipulation et de la découpe. Ce film doit être enlevé avant l'application. Longueur des rouleaux : 25 - 50 - 100 m.

2.4.3.3. Préparation de Primaire FB-RC01

Le dosage des deux composants doit être effectué avec une grande précision, par pesée, dans le rapport résine/catalyseur de 2 : 1. La quantité de résine à préparer doit être proportionnelle au travail à effectuer et aux temps de gel. L'application peut se faire au pinceau ou au rouleau, avec une consommation approximative de 300 g/m², mais la quantité réelle de résine dépend de la porosité du support et de sa capacité d'absorption.

2.4.3.4. Préparation de Colle époxy FB-RC30/3

Le dosage des deux composants doit être effectué de manière très précise, par pesée, dans le rapport résine/catalyseur égal à 4 : 1. La quantité de résine à préparer doit être proportionnelle au travail à effectuer et au temps de polymérisation. L'application doit être effectuée à l'aide d'une spatule. La consommation réelle peut varier en fonction du degré de finition du support.

2.4.3.5. Pose du BETONTEX Preformed Laminate Systems

L'application du système de renforcement doit être effectuée à des températures comprises entre +5°C et +30°C. Pendant l'application, le support, la colle et l'adhésif ne doivent pas être exposés à un rayonnement direct, à des sources de chaleur et/ou à l'humidité.

L'application n'est pas autorisée dans des environnements particulièrement humides ou en présence de phénomènes de condensation sur les surfaces à renforcer : les surfaces doivent être complètement sèches.

Le support doit être propre, exempt de poussière, d'huile, de graisse et/ou de produits de démoulage :

1. Éliminer les enduits et les coulis de surface ainsi que les parties endommagées. Procéder au nettoyage des armatures métalliques oxydées à l'aide d'équipements appropriés et appliquer les revêtements de protection adéquats, en reconstruisant les parties manquantes, le tout à l'aide de mortiers aux caractéristiques adéquates. Réaliser, à l'aide d'un mortier approprié, la bande (piste) plus large que la lamelle à appliquer afin de créer une surface lisse et régulière adaptée à l'application du composite. Pour le renforcement des éléments de maçonnerie dans les zones où l'armature doit être appliquée, enlever le mortier des joints sur une profondeur d'environ 10-15 mm ;
2. Appliquer le primaire Betontex FB-RC01 dans une quantité ≥ 300 g/m² avec un rouleau à poils courts et le laisser durcir pendant une heure (maximum 3 heures) ;
3. Appliquer une couche de résine adhésive Betontex FB-RC30/3 sur la surface à renforcer ;
4. Immédiatement avant l'application, enlever la pellicule de la lamelle sur la face à coller et appliquer une couche de résine adhésive Betontex FB-RC30/3 ;
5. Appliquer la lamelle de carbone en exerçant une légère pression à l'aide d'un rouleau en plastique rigide ;
6. Éliminer l'excès de résine ;
7. Avant l'application de toute protection/couverture de surface de l'armature, enlever le film pelable présent sur l'armature en le décollant ;
8. Avant l'application de toute protection/couverture de surface, enlever le film pelable présent sur la surface ;
9. En fonction de la protection et/ou du revêtement à appliquer et si cela est jugé nécessaire, il est possible d'améliorer encore les conditions d'adhésion à la surface de la lamelle déjà appliquée en appliquant un primaire époxy et en procédant à un saupoudrage de sable de quartz d'une granulométrie appropriée.

2.4.3.6. Protection contre la corrosion

Les procédés **BETONTEX Preformed Laminate Systems** étant des matériaux à base de fibres de carbone, ils sont insensibles à la corrosion, et de ce fait ne nécessitent pas de protection particulière.

2.4.3.7. Protection contre le feu

Concernant la justification au feu de la structure renforcée, il s'agit de vérifier en faisant un calcul à l'ELU, sous combinaisons accidentelles, que la structure tient toujours. Si cela est vérifié, le système **BETONTEX Preformed Laminate Systems** n'a pas besoin de protection au feu.

Dans le cas contraire, il convient de protéger le renforcement par un produit isolant pour que la température de l'interface de collage reste inférieure à la température de transition vitreuse de **FB-RC01** et **FB-RC30/3** selon le procédé mis en place. Le procédé retenu, devra avoir fait l'objet d'essai de résistance au feu, effectué sur un support identique, par un Laboratoire agréé

par le ministère de l'Intérieur. L'attention est attirée sur le fait que les caractéristiques mécaniques de la colle diminuent rapidement lorsque la température augmente.

2.4.4. Contrôle de la mise en œuvre

Durant toute la réalisation du chantier, l'entreprise procède à différents contrôles définis par son Plan de Contrôle. Afin d'assurer une mise en œuvre conforme aux exigences décrites par le présent cahier des charges, et ainsi obtenir les performances mécaniques annoncées, le plan de contrôle interne à l'entreprise doit reprendre au minimum les exigences et caractéristiques définies dans les fiches d'auto-contrôle rassemblées en annexe.

2.5. Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication

Les éléments entrant dans la constitution du procédé sont fabriqués par la société Fibre Net S.p.A. pour les plats et par la société Fibre Net S.p.A. pour les résines. Les usines font l'objet d'une certification ISO 9001.

2.5.1. Contrôles de fabrication

La fabrication des lamelles et de la colle, font l'objet d'un plan d'assurance-qualité dans les usines concernées. Sur demande un certificat de conformité peut être fourni.

2.5.2. Identification du produit

Les lamelles sont identifiées par la désignation et les dimensions du produit, par un numéro de lot composé de la date de fabrication suivi d'un code de production. Cette désignation et numéro sont inscrits sur chaque rouleau de lamelle.

Il en est de même sur le conditionnement des résines.

2.6. Résultats expérimentaux

Les essais de caractérisation du procédé **BETONTEX Preformed Laminate Systems** ont été réalisés au sein par le laboratoire du Département d'ingénierie structurelle de l'Université du Salento (Italy), en octobre 2024, en juin et en octobre 2025.

Rapport d'essais n° 237/24, n° 238/24 et n° 239/24 de 11 décembre 2024.

- Essais de traction directe,

Rapport d'essais n° Test Report Betontex Preformed Laminate System de 22 d'octobre 2025.

- Essais de traction directe traitement des données,
- Essais de traction-cisaillement pour la tenue au délaminage,
- Essais de traction-cisaillement pour la caractérisation de l'interface composite-béton ;

Les essais de caractérisation des colles époxy (détermination de la température de transition vitreuse Tg) ont été réalisés en Italie au sein du le laboratoire du Département d'ingénierie structurelle de l'Université du Salento.

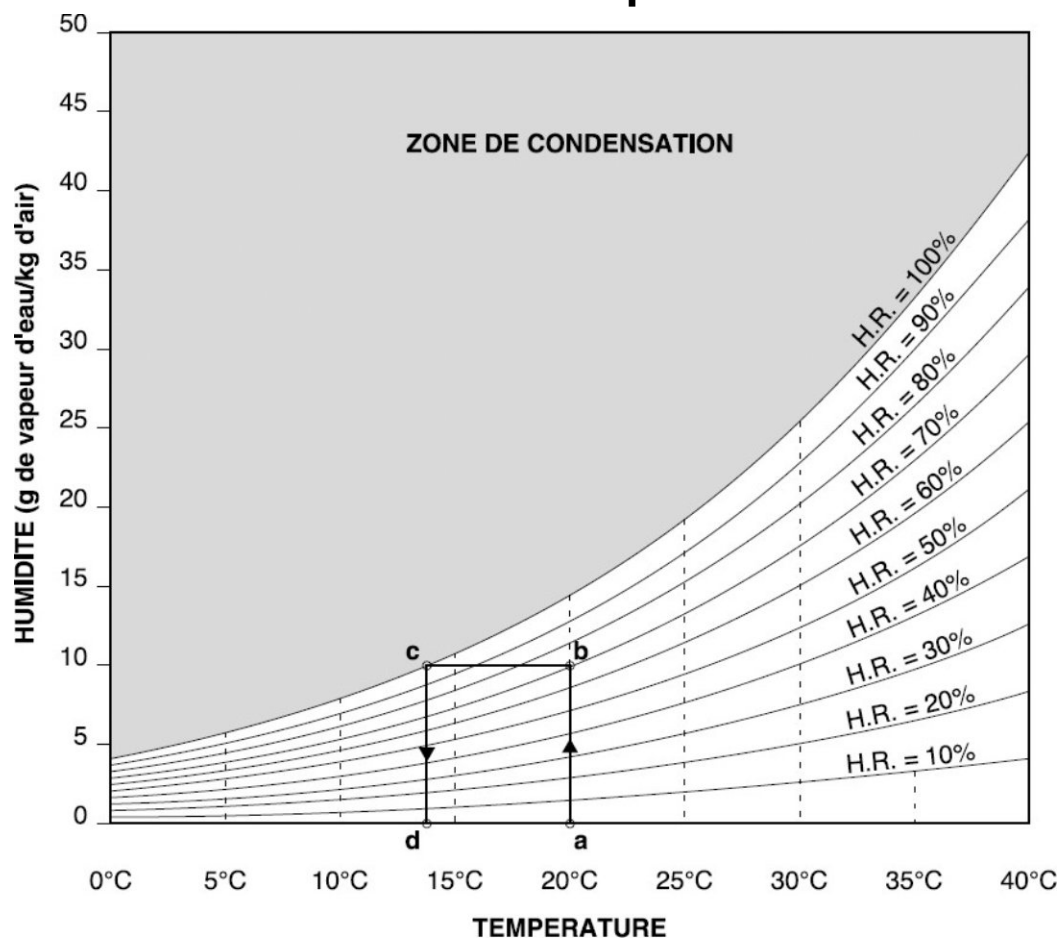
2.7. Références

2.7.1. Références chantier

Le tableau ci-dessous reprend quelques-uns des chantiers réalisés :

Chantiers	Description du projet	Références	Quantités	ANNEE DE REALISATION
MOULIN ROUGE : 82 Boulevard de Clichy 75018 PARIS	Travaux de renforcement structurel de poutres en BA	FB-G14L-HT100 Lamelles en fibre de carbone La. 100 mm ép. 1,4mm, 170 GPA	13 ML	2024
		FB-G14L-HT150 Lamelles en fibre de carbone La. 100 mm ép. 1,4mm, 170 GPA	13 ML	2024
		FB-RC30/3-5 - colle bicomposante époxy	10 KG	2024
Levallois Perret : 1-3 Sq. André Malraux - 92300	Travaux de reprises structurelles	FB-G14L-HT100 Lamelles en fibre de carbone La. 100 mm ép. 1,4mm, 170 GPA	72 ML	2024
		FB-RC30/3-5 - colle bicomposante époxy	30 KG	2024

ANNEXE 1 : Contrôle du risque de condensation sur le support



Ce diagramme permet de contrôler le risque de condensation sur les supports. Il faut connaître trois paramètres :

- La température ambiante,
- L'humidité relative de l'air,
- La température du support.

Le principe d'utilisation est le suivant : pointer la température ambiante (point a), prendre la verticale jusqu'à couper la courbe correspondant à l'humidité relative (point b), suivre l'horizontale jusqu'à couper la courbe humidité relative égale 100 % (point c), lire la température à la verticale de ce dernier point (point d).

Cette température, température du point de rosée, est celle du support en dessous de laquelle il y a condensation. La température du support doit donc être supérieure à cette dernière valeur augmentée de 3 degrés.

Exemple : pour T ambiante = 20°C et HR = 70 %, la température du support doit être supérieure à 17°C = 14°C + 3°C).

Il existe des calculateurs du point de rosée. Quelques liens pour y accéder :

<https://fr.planetcalc.com/248/>

www.suto-itec.com/fr/humcalc/

www.deleze.name/marcel/physique/rosee/rosee.html

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	17,2	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 = 15C°

Formation du point de rosée à une température de 4C° (suivant tableau) On ajoute 3C°

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

ANNEXE 2 : Fiches d'auto-contrôle

<u>FICHE N°1 : QUALITE ET RESISTANCE DU SUPPORT</u>		
Entreprise : Date : Chantier : Type de structure à renforcer : Nature du support : Localisation / Zone des renforts à mettre en place : Nom contrôleur interne :		
CRITERES	CONFORMITE (OUI/NON)	ACTIONS CORRECTIVES SI NON CONFORME
Accessibilité du support		Réponse Maître d'œuvre
Préparation du support - Absence de revêtement existant (peinture, enduit) - Présence d'huile, graisse, sels, laitance - Absence de dégradations superficielles du support béton - Cohésion suffisante des anciennes réparations (les sonner pour diagnostiquer)		- Elimination du revêtement (sablage, lavage haute pression, ponçage) - Elimination (sablage, lavage haute pression, ponçage) - Réparation selon NFP 95101 - Elimination des zones puis réparation selon NFP 95101
Mesure de la cohésion superficielle du béton (essai SATTEC) selon la méthodologie de la norme NF EN 1542 : - Localisation des essais indiquée par le maître d'œuvre - Cohésion superficielle du béton $\geq 1,5$ MPa La localisation des pastilles d'essais, ainsi que les résultats de cohésion obtenus seront rassemblés sur un document séparé. Pas de film d'eau à la surface du support. Mesure du taux d'humidité résiduelle du support $< 5\%$. Mesurer au moyen d'une sonde hygrométrique ou similaire dans les surfaces concernées par le collage des composites		- Elimination puis reconstitution selon NFP 95101 - Si le taux est supérieur à 5%, prévoir un dispositif de chauffage du support par exemple et refaire une mesure. Répéter l'opération jusqu'à obtention d'un taux d'humidité inférieur à 5%

FICHE N°2 : ASPECT DE SURFACE

Entreprise : Date :
 Chantier :
 Type de structure à renforcer :
 Nature du support :
 Localisation / Zone des renforts à mettre en place :
 Nom contrôleur interne :

CRITERES	CONFORMITE (OUI/NON)	ACTIONS CORRECTIVES SI NON CONFORME
Peau continue • Absence de corps étrangers et zones ségrégées • Absence d'excroissances et balèvres • Absence de fissures (> 0,3 mm) • Absence de cavités • Arêtes meulées • Angles arrondis		• Elimination des zones puis réparation selon NFP 95101 • Elimination des zones puis réparation selon NFP 95101 • Injection selon NFP 95103 • Réparation selon NFP 95101 • Meulage des arêtes (chanfrein de rayon de courbure d'au moins 2 cm) • Arrondi des angles (rayon de courbure d'au moins 2 cm)
Planéité du support Tolérance parement : • Règle de 2 m : 8 mm • Réglet de 20 cm : 3 mm		• Article 52.2.1 du fascicule N°65-A

FICHE N°3 : CONTRÔLE DES CONDITIONS CLIMATIQUES ET D'ENVIRONNEMENT

Entreprise : Date :
 Chantier :
 Type de structure à renforcer :
 Nature du support :
 Localisation / Zone des renforts à mettre en place :
 Nom contrôleur interne :

CRITERES	CONFORMITE (OUI/NON)		ACTIONS CORRECTIVES SI NON CONFORME
- Absence de pluie - Absence de vent violent - Absence de poussière - Stockage des matériaux dans un local sec et couvert à une température > 5°C			- Mise en place de moyens de protection - Stockage dans un local vérifiant ces critères
	Valeur Mesurée	Confor- mité	
Température de l'air lors de la mise en œuvre - comprise entre +5°C et +30°C Température du support - comprise entre +5°C et +30°C Contrôle du risque de condensation (utilisation du diagramme de Mollier) - Hygrométrie de l'air < 80 % - Température du point de rosée (Tr) - Température du support comprise entre (Tr + 3) et +30°C			- Mise en place de moyens de protection, sinon attendre que le critère soit respecté - Mise en place de moyens de protection, sinon attendre que le critère soit respecté - Si oui : Vérification journalière du risque de condensation - Si non : Vérification horaire du risque de condensation

FICHE N°4 : CONTRÔLE DE LA MISE EN ŒUVRE DU BETONTEX Preformed Laminate Systems

Entreprise : Date :
 Chantier :
 Type de structure à renforcer :
 Nature du support :
 Localisation / Zone des renforts à mettre en place :
 Type de renfort utilisé (références, n° de lot) :
 Nom contrôleur interne :

CRITERES	CONFORMITE (OUI/NON)	ACTIONS CORRECTIVES SI NON CONFORME
Résine BETONTEX RC 01 (Application systématique) et BETONTEX RC30/3 - Utilisation d'un malaxeur lent - Mélange homogène de couleur uniforme jaune clair		Continuer à malaxer
Lamelles BETONTEX PREFORMED SYSTEMS - Module élastique, largeur et longueur correspondant à la note de calcul - Pas de défaut visuel de la lamelle (Lamelle endommagée)		Remplacement de la lamelle
Mise en œuvre - Appliquer BETONTEX RC 01 sur le support béton à la spatule - Appliquer BETONTEX RC30/3 à la spatule		