

Sur le procédé

## Sika CarboDur

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

**Titulaire(s)** : **Société SIKA France SA**

### AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

## Versions du document

| Version | Description   | Rapporteur | Président                    |
|---------|---|------------|------------------------------|
| V3      | <p>Cette version, examinée le 03 juillet 2024, annule et remplace l'avis technique 3.3/20-1021_V2.</p> <p>Elle intègre les modifications suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajout de l'utilisation des renforts de type « lamelles engravées ».</li> <li>• Suppression de l'exclusion d'utilisation dans des environnements marins</li> <li>• Modification des conditions d'utilisation dans les DROM-COM.</li> </ul> | PAYET Loïc | BERNARDIN-EZRRAN<br>Roseline |
| V2      |   | PAYET Loïc | BERNARDIN-EZRRAN<br>Roseline |

### Descripteur :

Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller sur la surface ou dans des rainures, des éléments visés des renforts de fibres de carbone à l'aide d'une résine époxydique synthétique à deux composants. Le procédé Sika® CarboDur® est utilisé pour le renforcement en flexion. Les renforts à engraver sont utilisés pour le renforcement en flexion en partie supérieure des éléments.

Ce procédé est destiné à augmenter la capacité portante des éléments concernés, par fonctionnement mécanique co njoint élément-renfort, grâce à l'adhérence conférée par la résine après son durcissement, entre les deux matériaux. Utilisé pour le renforcement des structures existantes ou neuves, constituées de béton armé et/ou précontraint.

Les résistances de calcul des éléments constitutifs sont présentées dans l'Annexe 1.

Le procédé Sika® CarboDur® peut être associé au procédé SikaWrap® qui fait l'objet d'un Avis Technique en cours de validité.

## Table des matières

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | Avis du Groupe Spécialisé.....   | 5  |
| 1.1.   | Domaine d'emploi accepté.....  | 5  |
| 1.1.1. | Zone géographique.....   | 5  |
| 1.1.2. | Ouvrages visés.....  | 5  |
| 1.2.   | Appréciation sur le procédé.....   | 5  |
| 1.2.1. | Aptitude à l'emploi du procédé.....  | 5  |
| 1.2.2. | Durabilité - Entretien.....  | 6  |
| 1.2.3. | Impacts environnementaux.....  | 6  |
| 1.3.   | Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé.....  | 6  |
| 2.     | Dossier Technique.....   | 7  |
| 2.1.   | Mode de commercialisation.....   | 7  |
| 2.1.1. | Coordonnées.....   | 7  |
| 2.1.2. | Identification des composants.....   | 7  |
| 2.2.   | Description.....   | 7  |
| 2.2.1. | Principe.....  | 7  |
| 2.2.2. | Caractéristiques des composants.....   | 8  |
| 2.2.3. | Produits complémentaires.....  | 12 |
| 2.2.4. | Durabilité du composite Sika CarboDur®.....  | 13 |
| 2.3.   | Dispositions de conception du renforcement.....  | 13 |
| 2.3.1. | Généralités.....   | 13 |
| 2.3.2. | Loi de comportement des matériaux.....   | 14 |
| 2.3.3. | Interface composite/béton.....   | 16 |
| 2.3.4. | Interface composite/composite.....   | 17 |
| 2.3.5. | Justification à la rupture.....  | 17 |
| 2.3.6. | Dimensionnement en flexion du procédé Sika CarboDur® suivant les règles AFGC - BAEL / BPEL.....    | 18 |
| 2.3.7. | Dimensionnement en flexion du procédé Sika CarboDur® suivant le référentiel TR55 (Eurocode 2)..... | 21 |
| 2.4.   | Dispositions de mise en œuvre.....   | 29 |
| 2.4.1. | Généralités.....   | 29 |
| 2.4.2. | Dispositions constructives.....  | 29 |
| 2.4.3. | Travaux préparatoires.....   | 31 |
| 2.4.4. | Conditions générales d'application.....  | 32 |
| 2.4.5. | Méthodologie de mise en œuvre.....   | 32 |
| 2.4.6. | Préconisations de mise en œuvre des lamelles Sika CarboDur® collées.....                           | 33 |
| 2.4.7. | Préconisations de mise en œuvre particulières pour les lamelles Sika CarboDur® à engraver.....     | 36 |
| 2.4.8. | Finition et Protection des renforts Sika CarboDur®.....  | 37 |
| 2.4.9. | Contrôle des travaux.....  | 38 |
| 2.5.   | Maintien en service du produit ou procédé.....   | 39 |
| 2.6.   | Assistance technique.....  | 39 |
| 2.6.1. | Assistance technique lors du dimensionnement.....  | 39 |
| 2.6.2. | Qualification de l'entreprise applicatrice des procédés Sika CarboDur®.....                        | 39 |
| 2.6.3. | Démarrage de chantier.....   | 39 |
| 2.7.   | Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication.....                                  | 39 |
| 2.8.   | Mention des justificatifs.....   | 39 |
| 2.8.1. | Références chantiers.....  | 40 |
| 2.9.   | Annexe du Dossier Technique.....   | 41 |
| 2.9.1. | Annexe 1 – Caractéristiques des composites Sika CarboDur®.....                                     | 41 |
| 2.9.2. | Annexe 2 – Contrôle du risque de condensation sur le support.....                                  | 43 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.9.3. | Annexe 3 – Fiches de contrôle interne à l'entreprise.....  | 45 |
| 2.9.4. | Annexe 4 – Vérifications particulières des renforts engravés Sika CarboDur® : Exemple de mise en application<br>51 |    |

# 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 européenne et dans les DROM-COM.

### 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 Sika® CarboDur® est utilisé pour le renforcement en 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'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 renforcement structurel des radiers est visé.

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

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 ou bois et métal), ne fait pas partie du champ du présent Avis.

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

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

- + 45°C en pointe (durée ≤ 24h) et +35°C en service continu (durée > 24h) pour les résines Sikadur® - 30 et Sikadur®-330 ;
- + 41°C en pointe (durée ≤ 24h) et +32°C en continu (durée > 24h) pour la résine Sikadur® -53 ;
- + 70°C en pointe (durée ≤ 24h) et +50°C en continu (durée > 24h) pour la résine Sika® Anchorfix®-3030.

Le procédé ne peut pas être utilisé dans les cas suivants :

- Surface du béton de cohésion superficielle inférieure à  $f_{tk} = 1,5$  MPa ;
- Milieux chimiques fortement agressifs en l'absence d'essai de durabilité sur les matériaux composites.

Le procédé Sika® CarboDur® peut être associé au procédé SikaWrap® qui fait l'objet d'un Avis Technique en cours de validité.

---

## 1.2. Appréciation sur le procédé

---

### 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 procédés sont non classés.

##### 1.2.1.2.2. Résistance au feu

En ce qui concerne la résistance au feu, le système de renforcement Sika® CarboDur® 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 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 - Entretien

La durabilité des éléments renforcés est normalement assurée, à l'exception des utilisations dans les locaux (ou ambiances) suivants :

- Atmosphère agressive (type solvant, etc.)
- Lorsque la température est susceptible de dépasser la température de pointe indiquée au paragraphe 2.2.2.3 (valeur de pointe : valeur dont la durée de maintien est inférieure à 24 heures) pour la résine utilisée.

En effet, pour la première restriction, la stabilité des caractéristiques mécaniques de la colle n'est pas démontrée. Pour la seconde restriction, la température de transition vitreuse des résines ne permet pas de dépasser une température en pointe indiquée au paragraphe § 1.1.2.

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. Données Environnementales

Le procédé 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.

##### 1.2.3.2. 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'entrent 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.

Enfin, 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.

## 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

Titulaire :  
Société SIKA France S.A.S.  
84, rue Edouard Vaillant  
FR – 93350 LE BOURGET  
Tél. : 01 49 92 80 00  
Email : hotline@fr.sika.com  
Internet : fra.sika.com

#### 2.1.2. Identification des composants

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

- Sika® CarboDur sont des lamelles à coller en surface, de différentes sections, fabriquées selon le procédé de pultrusion en usine. Disponibles en deux modules d'élasticité (S et M), elles sont identifiées par la désignation de la référence et le numéro de lot imprimés à intervalles réguliers sur l'une des faces (tous les 2 mètres environ). Livrées en rouleaux de différentes longueurs ;
- Sika® CarboDur S NSM sont des lamelles à engraver en surface, de différentes sections, fabriquées selon le procédé de pultrusion en usine. Elles sont identifiées par la désignation de la référence et le numéro de lot à relever sur le suremballage en carton ainsi que les bons de livraison. Livrées en rouleaux de différentes longueurs ;
- Sika® CarboDur BC sont des barres à engraver en surface, de différentes sections, fabriquées selon le procédé de pultrusion en usine. Elles sont identifiées par la désignation de la référence et le numéro de lot à relever sur les bons de livraison. Livrées en longueurs de 3 m ;
- Sikadur®-30 : livré en kit de 6 kg. Chaque kit est identifié par un numéro de lot imprimé sur l'étiquette ;
- Sikadur®-330 : livré en kit de 5 kg. Chaque kit est identifié par un numéro de lot imprimé sur l'étiquette ;
- Sikadur®-53 : livré en kit de 6 kg. Chaque kit est identifié par un numéro de lot imprimé sur l'étiquette ;
- Sikadur®-52 : livré en kit de 1 ou 4 kg. Chaque kit est identifié par un numéro de lot imprimé sur l'étiquette ;
- Sika® Anchorfix®- 3030 : livré en cartouches. Chaque cartouche est identifiée par un numéro de lot imprimée sur l'étiquette.

Les produits pour la mise en œuvre de renforts Sika® CarboDur® :

| Produit              | Utilisation  |
|----------------------|--|
| Sikadur®-30          | Colle époxy bi-composante thixotrope pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Collage du Sika® CarboDur® collés ou engravés</li> <li>• Collage de fouet de la mèche SikaWrap® FX-50C sur lamelle</li> </ul> |
| Sikadur®-53          | Résine époxy bi-composante liquide pour les renforts engravés en position horizontale (0 à 2% de pente)  |
| Sikadur®-330         | Résine époxy bi-composante thixotrope pour les renforts engravés   |
| Sikadur®-52          | Imprégnation de la mèche SikaWrap® FX-50C  |
| Sika AnchorFix®-3030 | Résine époxy bi-composante thixotrope pour le scellement de la mèche SikaWrap® FX-50C dans le support béton  |

### 2.2. Description

#### 2.2.1. Principe

Le procédé Sika CarboDur® est utilisé pour le renforcement des structures par collage ou engravure d'armatures additionnelles PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone). Il est adapté aux travaux sur ouvrages neufs ou en rénovation, en béton armé et béton précontraint.

Ce procédé est utilisé en tant que renfort d'éléments de structures travaillant en flexion.

Les renforts engravés sont utilisés pour le renforcement en flexion en partie supérieure des éléments, mais d'autres utilisations restent possibles.

## 2.2.2. Caractéristiques des composants

### 2.2.2.1. Définition des composites

Les composites Sika CarboDur® sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriqués selon le procédé de pultrusion en usine.

Contrôle de production : chaque lot de produits finis (env. 3000 m) est contrôlé en ce qui concerne le module d'élasticité, la résistance en traction, l'allongement à rupture. La géométrie des renforts (largeur, épaisseur, diamètre) est contrôlée sur chaque rouleau de 250 m.

Les caractéristiques utilisées dans les dimensionnements sont basées sur le traitement statistique des valeurs obtenues lors du contrôle qualité permanent assuré en usine.

Les composites Sika CarboDur® sont composées de fibres de carbone noyées dans de la résine époxydique :

- Couleur : noir ;
- Pourcentage volumétrique de fibres : > 68 % ;
- Densité : 1,6 ;
- Température de transition vitreuse > 100 °C.

#### **Lamelles Sika CarboDur® à coller**

Les lamelles à coller Sika CarboDur® sont disponibles en deux modules d'élasticité. Le choix final est fonction du besoin en renforcement, du type d'application.

- Type S : E = 170 000MPa
- Type M : E = 210 000MPa

Le type le plus couramment utilisé est le type S.

| Type de lamelle  | Sika CarboDur | Largeur (mm) | Épaisseur (mm) | Section (mm <sup>2</sup> ) | Masse (g/m) |
|------------------|---------------|--------------|----------------|----------------------------|-------------|
| Sika CarboDur® S | 512           | 50           | 1,2            | 60                         | 96          |
|                  | 614*          | 60           | 1,4            | 84                         | 134         |
|                  | 812           | 80           | 1,2            | 96                         | 153         |
|                  | 1012          | 100          | 1,2            | 120                        | 192         |
|                  | 914*          | 90           | 1,4            | 126                        | 202         |
|                  | 1014*         | 100          | 1,4            | 140                        | 224         |
|                  | 1214*         | 120          | 1,4            | 168                        | 269         |
|                  | 1512          | 150          | 1,2            | 180                        | 288         |
| Sika CarboDur® M | 514*          | 50           | 1,4            | 70                         | 112         |
|                  | 614*          | 60           | 1,4            | 84                         | 134         |
|                  | 914*          | 90           | 1,4            | 126                        | 202         |
|                  | 1014*         | 100          | 1,4            | 140                        | 224         |
|                  | 1214*         | 120          | 1,4            | 168                        | 269         |

\* uniquement sur commande spéciale, en rouleau de 250 m.

#### **Lamelles à engraver Sika CarboDur® S NSM**

| Type de lamelle      | Sika CarboDur | Largeur (mm) | Épaisseur (mm) | Section (mm <sup>2</sup> ) | Masse (g/m) |
|----------------------|---------------|--------------|----------------|----------------------------|-------------|
| Sika CarboDur® S NSM | 1.030         | 10           | 3              | 30                         | 48          |
|                      | 1.525*        | 15           | 2,5            | 37,5                       | 60          |
|                      | 2.025*        | 20           | 2,5            | 50                         | 80          |

\* uniquement sur commande spéciale, en rouleau de 250 m.

#### **Barres à engraver Sika CarboDur® BC**

| Type de lamelle   | Sika CarboDur | Diamètre (mm) | Section (mm <sup>2</sup> ) | Masse (g/m) |
|-------------------|---------------|---------------|----------------------------|-------------|
| Sika CarboDur® BC | 6             | 6             | 28                         | 45          |
|                   | 8             | 8             | 50                         | 80          |
|                   | 10            | 10            | 79                         | 126         |
|                   | 12            | 12            | 113                        | 181         |

Les caractéristiques selon la norme ISO 527-5 des composites (résistance à la traction, module d'élasticité) sont données dans le tableau ci-dessous :

|  |       | Sika CarboDur® S | Sika CarboDur® M | Sika CarboDur® S NSM | Sika CarboDur® BC 6 | Sika CarboDur® BC 8 | Sika CarboDur® BC 10 | Sika CarboDur® BC 12 |
|--|-------|------------------|------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Module d'élasticité (valeur moyenne)                 | [GPa] | 170              | 210              | 170                  | 175                 | 153                 | 150                  | 150                  |
| Module d'élasticité caractéristique (fractile 5%)    | [GPa] | 165              | 205              | 165                  | 170                 | 150                 | 140                  | 140                  |
| Allongement à rupture (valeur moyenne)               | [%]   | 1,89             | 1,7              | 1,7                  | 1,7                 | 1,6                 | 1,5                  | 1,5                  |
| Allongement à rupture caractéristique (fractile 5%)  | [%]   | 1,76             | 1,56             | 1,6                  | 1,6                 | 1,4                 | 1,3                  | 1,3                  |
| Résistance en traction (valeur moyenne)              | [MPa] | 3100             | 3200             | 3100                 | 3100                | 2500                | 2300                 | 2300                 |
| Résistance caractéristique en traction (fractile 5%) | [MPa] | 2900             | 3200             | 2900                 | 3000                | 2200                | 1900                 | 1900                 |

#### 2.2.2.2. Résines

Les adhésives époxydiques à deux composants, thixotrope ou liquide, conditionnés en kits prédosés.

Les adhésives bénéficient d'un marquage CE conformément à la norme NF EN 1504-4, 1504-5 et 1504-6.

|  | Références normatives          | Sikadur®-30  | Sikadur®-330                       | Sikadur®-52                            | Sikadur®-53   | Sika Anchorfix®-3030  |
|--|--------------------------------|--|------------------------------------|--|---|---|
| Agréments / Normes                                 |                                | Marquage CE NF EN 1504-4 : Collage ; NF EN 1504-3 : Réparation | Marquage CE NF EN 1504-4 : Collage | Marquage CE NF EN 1504-5 : Injection ; | Marquage CE NF EN 1504-4 : Collage ; NF EN 1504-5 : Injection ; NF EN 1504-6 : Scellement | Marquage CE : Produit d'ancrage pour scellements dans du béton fissuré / non fissuré, selon EAD 330499-00-0601, basé sur ETA 17/0694.<br>Marquage CE : Produit d'ancrage pour scellements d'armatures de connexion, selon ETAG 001, Partie 1 et 5, édition 2013, utilisé comme EAD, basé sur ETA 17/0693. |
| Densité  | ISO 2811 (A+B à +20°C), kg/l   | 1,98 ± 0,1   | 1,30 ± 0,1                         | -                                      | 2,04 ± 0,1  | 1,5 ± 0,1   |
| Viscosité  | ISO 3219                       | Pâte thixotropique   | Crème, 6000 mPas à +23°C           | Fluide, 430 mPas à +23°C               | Fluide, 5800 mPas à +23°C   | Pâte thixotropique  |
| Durée pratique d'utilisation à +20°C               | EN ISO 9514                    | 90 min   | 60 min                             | 30 min                                 | 30 min  | 30 min  |
| Températures d'utilisation (produit, support, air) |                                | +8 à +35°C   | +10 à +35°C                        | +5 à +30°C                             | +5 à +30°C  | +5 à +40°C  |
| Consommation* (kg/m)                               |                                | 0,2 - 0,6  | 0,1 - 0,3                          | 0,2 - 0,6                              | 0,2 - 0,6   | 0,2 - 0,4   |
| Résistance en Compression                          | EN 12190, 7j à +21°C           | ≥ 60 MPa   | ≥ 85 MPa                           | ≥ 55 MPa                               | ≥ 70 MPa  | ≥ 85 MPa  |
| Résistance en traction                             | NF EN ISO 527-3, 7j à +21°C    | ≥ 28 MPa   | ≥ 30 MPa                           | ≥ 37 MPa                               | ≥ 26 MPa  | ≥ 27 MPa  |
| Module d'Elasticité en Traction                    | ISO 527, 7j à +21°C            | 11200 MPa  | 4000 MPa                           | 1800 MPa                               | 4100 MPa  | 5500 MPa  |
| Adhérence  | EN 12188, 7j à +21°C sur acier | ≈ 32 MPa   | ≈ 31 MPa                           | -                                      | ≈ 21 MPa  | ≈ 21 MPa  |
| Dureté Shore D                                     | ISO-868, 48h à +21°C           | ≥ 70   | ≥ 80                               | ≥ 80                                   | ≥ 80  | ≥ 80  |

\* Valeurs ne tenant pas compte d'éventuelles pertes, résidus dans les pots et sur les outils. La consommation peut varier suivant la planéité, la rugosité du support etc.

**Tableau 1 : Caractéristiques des résines**

### 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 service continu (°C)<br>(Durée > 24h) | Température de pointe (°C)<br>(Durée ≤ 24h) |
|----------------------|--|--|---|
| Sikadur®-30          | +52  | +35  | +45   |
| Sikadur®-330         | +50  | +35  | +45   |
| Sikadur®-53          | +45  | +32  | +41   |
| Sikadur®-52          | +45  | +32  | +41   |
| Sika Anchorfix®-3030 | +51  | +50*   | +70*  |

\* Les températures de service continu et de pointe de Sika Anchorfix®-3030 ont été définies et validées dans le cadre de ETA 17/0694 de 25/10/2021.

#### 2.2.2.4. Mèche d'ancrage SikaWrap® FX-50C

##### 2.2.2.4.1. Principe de fonctionnement

La mèche SikaWrap® FX-50C peut être utilisée pour augmenter l'ancrage des composites Sika® CarboDur collés en surface. Elle est scellée dans un trou de diamètre de 20 mm et de profondeur minimale de 100 mm et stratifiée sur la lamelle Sika® CarboDur sur 200 mm de longueur.

##### 2.2.2.4.2. Description du système

Les produits pour la mise en œuvre de l'ancrage SikaWrap® FX-50C :

| Produit              | Utilisation                            |
|----------------------|--|
| Sikadur®-52          | Imprégnation de mèche SikaWrap® FX-50C |
| Sika AnchorFix®-3030 | Scellement de mèche dans le trou       |
| Sikadur®-30          | Collage de fouet sur la lamelle        |

##### 2.2.2.4.3. Caractéristiques SikaWrap® FX-50C

Configuration de la mèche

- Nombre de fils / diamètre / section : F13 (48K) / 10 mm / 28 mm<sup>2</sup> ;
- Masse linéique : ≥ 50g/m ;
- Masse volumique : 1.82 g/cm<sup>3</sup> ;

Caractéristiques de la fibre sèche (sens longitudinal)

- Contrainte en traction : > 4000 MPa ;
- Module d'élasticité en traction : > 240 000 MPa ;
- Déformation à la rupture : ≥ 1,6 %.

##### 2.2.2.4.4. Caractéristiques de composite SikaWrap® FX-50C imprégné

Caractéristiques de composite SikaWrap® FX-50C imprégné avec Sikadur®-52, obtenu dans le sens longitudinal des fibres selon la norme EN 2561. Les valeurs caractéristiques (fractile 5%), présentée ci-dessous, ont été obtenues suivant la section nette des fibres (28 mm<sup>2</sup>) selon la norme EN 2561 :

- Contrainte de traction à la rupture : 2100 MPa ;
- Module d'élasticité : 230 000 MPa ;
- Allongement ultime : 0,90 %.

##### 2.2.2.4.5. Adhérence Mèches

Les performances indiquées ci-dessous proviennent des résultats d'essais menés au sein des laboratoires LMC2 et LCPC.

| Type d'essai / Caractéristique mécanique  |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Tenu au délaminage par cisaillement interlaminaire selon ASTM D3165 (Sika® CarboDur® / Sikadur®-30 / SikaWrap® FX-50C)* | 37,2 kN<br>(Valeur moyenne)         |
|   | 30,6 kN<br>(Valeur caractéristique) |
|   | 21,8 kN<br>(Valeur de calcul ELU)   |

\*L'utilisation de la mèche SikaWrap® FX-50C est limitée pour un béton de classe de résistance minimale C25/30.

### 2.2.3. Produits complémentaires

#### 2.2.3.1. Préparation du support

##### **Sikadur®-52**

Résine époxydique à deux composants sans solvant. Utilisée pour injecter les fissures du support avant le renforcement. Conforme à la norme NF EN 1504-5.

##### **Sikadur®-41+**

Mortier époxydique à trois composants (résine, durcisseur, charges). Utilisé pour les réparations localisées du support. Classe R4 selon la norme NF EN 1504-3.

##### **Sikadur®-30**

Pâte époxydique de ragréage à deux composants. Permet les réparations sur de faibles épaisseurs. Conforme à la norme NF EN 1504-4 et 3.

##### **Sika MonoTop®-4012F, -410R**

Mortiers de réparation du béton, monocomposant, applicable manuellement ou par projection voie humide. Classe R4 selon norme NF EN 1504-3.

#### 2.2.3.2. Produits de finitions

##### 2.2.3.2.1. Nettoyage des renforts

###### **Nettoyant Sikadur**

Il est utilisé pour nettoyer et dégraisser les renforts Sika CarboDur® avant la mise en place.

##### 2.2.3.2.2. Revêtements de protection base Polymères

Il s'agit de revêtements à base de polymères destinés à assurer la protection du support béton et des composites Sika CarboDur®. Le maître d'œuvre détermine la couleur sur la base du nuancier RAL.

###### **Sikagard®-675 W ElastoColor**

Revêtement acrylique en phase aqueuse. Faible temps de recouvrement entre couches. Conforme à la norme NF EN 1504-2.

###### **Sikagard®-5500**

Revêtement acrylique élastique en phase aqueuse. Souplesse pour le pontage de fissures. Conforme à la norme NF EN 1504-2.

###### **Sikagard®-680 S BetonColor**

Revêtement acrylique en phase solvant. Protection hautes performances, conforme à la norme NF EN 1504-2.

###### **Sikagard®-63 N**

Revêtement de protection, à base de résine époxydique bi-composante. Conforme à la norme NF EN 1504-2.

###### **Sikafloor®-400 N Elastic**

Résine polyuréthane solvantée mono composant colorée. Revêtement d'étanchéité circulaire. Conforme à la norme NF EN 1504-2.

###### **Sikafloor-264**

Résine époxydique colorée polyvalente. Protection des sols à trafics moyens. Conforme à la norme NF EN 1504-2.

##### 2.2.3.2.3. Revêtements de protection base ciment

###### **SikaTop®-107 Protection**

Micro-mortier à base de liant hydraulique destiné à recouvrir les composites Sika CarboDur®. Protection vis-à-vis des rayons solaires directs, des ambiances environnementales agressives. Conforme à la norme NF EN 1504-2.

###### **SikaTop®-121 Surfaçage**

Mortier de surfaçage à base de liant hydraulique modifié destiné à recouvrir les composites Sika CarboDur®.

Protection vis-à-vis des rayons solaires directs, des ambiances environnementales agressives. Conforme à la norme NF EN 1504-2.

###### **Sika FastFix®- 134 TP**

Mortier de réparation du béton, classe R4 selon norme NF EN 1504-3, mono composant. Il est utilisé pour le reprofilage de dalles, voies de circulation.

## 2.2.4. Durabilité du composite Sika CarboDur®

### 2.2.4.1. Tenue aux UV

Les essais ont été menés sur le système seul et sur le système revêtu des revêtements de la gamme Sikagard (Sikagard-550 W Elastic, Sikagard-675 W ElastoColor, Sikagard-680 S BétonColor). Deux tests ont été pratiqués : le Sun test - 1000 heures (UV seuls) et le QUV test - 3000 heures (UV et Chaleur Humide).

Résultats : Pas de dégradations observées (rapport d'essais interne n°33001-10 ; 01/2010)

### 2.2.4.2. Performances après 18 mois de vieillissement accéléré en enceinte climatique à 40°C et 95% HR.

Les matériaux seuls ainsi que l'assemblage béton/adhésif/lamelle ont subi les essais suivants :

- Essais de cisaillement sur support béton
- Essai de traction directe
- Essais spécifiques sur la résine Sikadur-30.

Les mesures ont été faites à intervalles réguliers afin de suivre l'évolution des performances des matériaux et de leur assemblage.

**Résultats** : Après 18 mois sous les conditions climatiques de l'essai, les performances des assemblages sont conservées, même si une évolution du mode de rupture est observée (passage d'un mode cohésif dans le béton à un mode adhésif/cohésif dans la colle et/ou interface) (rapport LCPC-LRPC Autun n°20 112-A, Février 2010).

### 2.2.4.3. Adhérence sur béton après cycles de vieillissement accéléré (pluie, gel, dégel, chaleur humide, chaleur sèche, UV).

Ces essais ont été réalisés sur le système seul (Sika CarboDur® / Sikadur®-30) ainsi que sur le système revêtu par le revêtement de protection Sikagard -675 W ElastoColor, conforme à la norme NF EN 1504-2. Dans chaque cas, le système a été testé dans 4 conditions de température et d'humidité différentes pour refléter les cas particuliers qu'il est possible de rencontrer sur chantier, ainsi que pour tester les systèmes jusqu'à leurs limites d'utilisation.

Résultat de l'essai de traction directe avant et après vieillissement climatique accéléré (selon la norme NF EN 1542) : Adhérence > 5 MPa avec rupture dans le support béton.

### 2.2.4.4. Essais de traction uni-axiale avant et après vieillissement

Ces essais ont été réalisés selon la norme NF EN ISO 527-5 sur la lamelle avant et après 100 cycles de vieillissement accéléré réalisé au laboratoire LGCIE de L'Université de Lyon 1.

| Valeurs moyennes           | Résistance à la traction uni-axiale [MPa] | Module d'élasticité [MPa] |
|----------------------------|---|---------------------------|
| Essai avant vieillissement | 3195                                      | 179 781                   |
| Essai après vieillissement | 3158                                      | 172 000                   |

## 2.3. Dispositions de conception du renforcement

### 2.3.1. Généralités

Le renforcement structural d'un ouvrage existant doit faire suite à un diagnostic préalable (détermination des capacités résistantes) aussi précis que possible, permettant de dimensionner et de mettre en œuvre les renforcements de manière pertinente.

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

Sika met à la disposition des calculateurs un logiciel de dimensionnement Sika CarboDur développé en interne. La responsabilité des résultats et donc de la structure du logiciel revient au Titulaire. Toutefois, le bureau d'étude structure utilisateur du logiciel reste responsable de la bonne utilisation du logiciel suivant le cahier des charges fourni et de la définition des hypothèses et des données d'entrée.

Une section renforcée se comporte de la même manière qu'une section de béton armé classique ; le composite se comporte en armature externe. Ainsi, le dimensionnement du renforcement suit les règles de Eurocode 2, TR55 ou BAEL concernant les armatures en acier en les adaptant aux caractéristiques des matériaux composites. Pour cela, on complète ces règles avec celles fournies par les recommandations de l'AFGC.

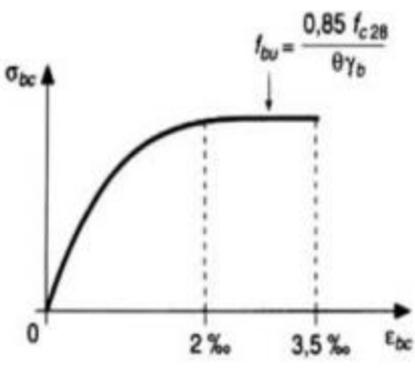
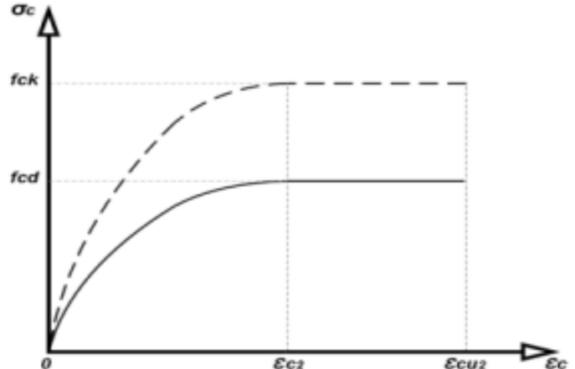
Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Les sections planes restent planes après déformation (hypothèse de Navier-Bernouilli) ;
- 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 ;

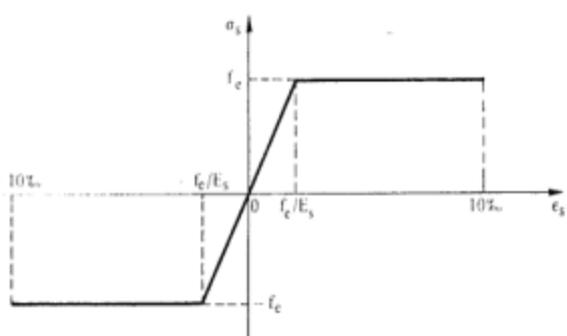
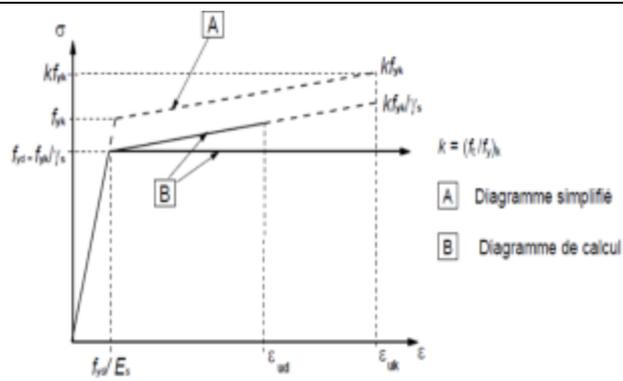
- Les diagrammes contrainte – déformation de calcul du béton, de l'acier passif et de précontrainte et du composite considérés sont ceux du paragraphe 2.3.2.

### 2.3.2. Loi de comportement des matériaux

#### 2.3.2.1. Béton

| selon BAEL 91/99  | selon Eurocode-2  |
|---|---|
|    |   |
| <p>Le béton est caractérisé par sa résistance de calcul <math>f_{bu}</math></p> $f_{bu} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{1,5}$ | <p>La valeur de la résistance du béton en compression de calcul est donnée par la formule :</p> $f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ <p><math>\alpha_{cc} = 1</math> Valeur utilisée pour l'Annexe Nationale française (valeur recommandée pour les bâtiments). Le coefficient <math>\alpha_{cc}</math> tient compte de l'effet défavorable de la durée d'application des charges.</p> <p><math>\gamma_c = 1,2</math> Pour les situations accidentelles ;<br/> <math>\gamma_c = 1,5</math> Dans les autres cas.</p> |

#### 2.3.2.2. L'armature interne en acier

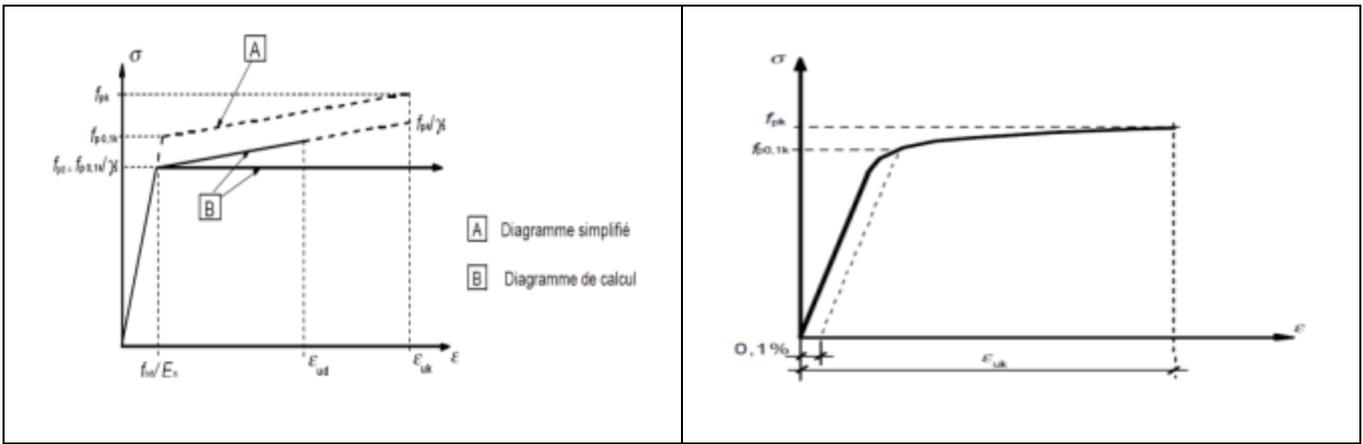
| Selon BAEL 91/99   | Selon Eurocode-2  |
|--|---|
|   |   |
| <p>L'armature est définie par sa résistance de calcul <math>f_{su}</math> et par son diagramme de calcul avec palier de plasticité :</p> $f_{su} = \frac{f_u}{1,15}$ | <p>La valeur de la résistance à la traction de l'acier de calcul est donnée par la formule :</p> $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ <p><math>\gamma_s = 1</math> dans les situations accidentelles ;<br/> <math>\gamma_s = 1,15</math> dans les autres cas.</p> |

#### Loi de comportement de l'acier

#### 2.3.2.3. Armatures de précontrainte

Dans le cas des armatures de précontrainte, plusieurs lois de comportement peuvent être utilisées (EC2-1-1 3.3) :

- La loi bilinéaire à palier horizontal [EC2-1-1 3.3.6 Fig.3.10] ;
- La loi bilinéaire avec raffermissement [EC2-1-1 3.3.6 Fig.3.10] ;
- Une loi représentant le diagramme réel des armatures, sous réserve de lui appliquer le coefficient  $\frac{1}{\gamma_s}$  au-delà de  $f_{p0,1k}$  [EC2-1-1 3.3.6(7)]. Pour les torons, la loi du règlement antérieur (conforme à la figure [EC2-1-1 3.3.6 Fig.3.9] peut donc être reprise, elle est mentionnée sur la figure suivante :



**Loi de comportement des armatures de précontrainte selon Eurocode-2**

Selon BPEL 91 rev.99, dans le cas des armatures de précontrainte, les diagrammes à utiliser pour les calculs sont donnés respectivement :

- en 2.1 pour les fils tréfilés à froid et les torons (sections II et V du titre II du fascicule 4 du CCTG),
- en 2.2 pour les fils trempés et revenus et les barres (sections III et IV du titre II du fascicule 4 du CCTG).

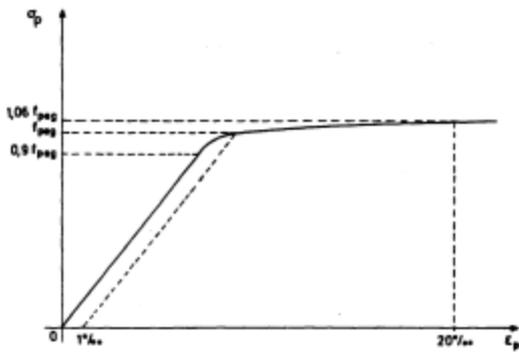
Dans tous les cas, le caractère de base est la limite conventionnelle d'élasticité à 0,1 % rapportée à l'unité de section nominale (notée  $f_{p0.1k}$ ).

Lorsque la nature de l'acier est ignorée, il est loisible de se référer au diagramme affecté aux fils trempés et revenus. Ce même diagramme est utilisable pour les fils tréfilés et torons si une grande précision n'est pas recherchée.

Fils tréfilés et torons :

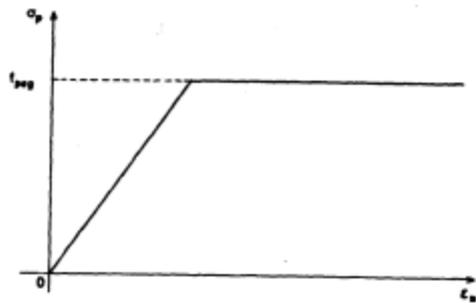
Le diagramme est du type ci-dessous avec une partie linéaire (de pente  $E_p$ ) pour  $\sigma_p \leq 0,9 f_{p0.1k}$  et une partie courbe, pour les valeurs supérieures, ayant pour équation :

$$\epsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100 \left( \frac{\sigma_p}{f_{p0.1k}} - 0,9 \right)^2$$



Fils trempés et revenus et barres

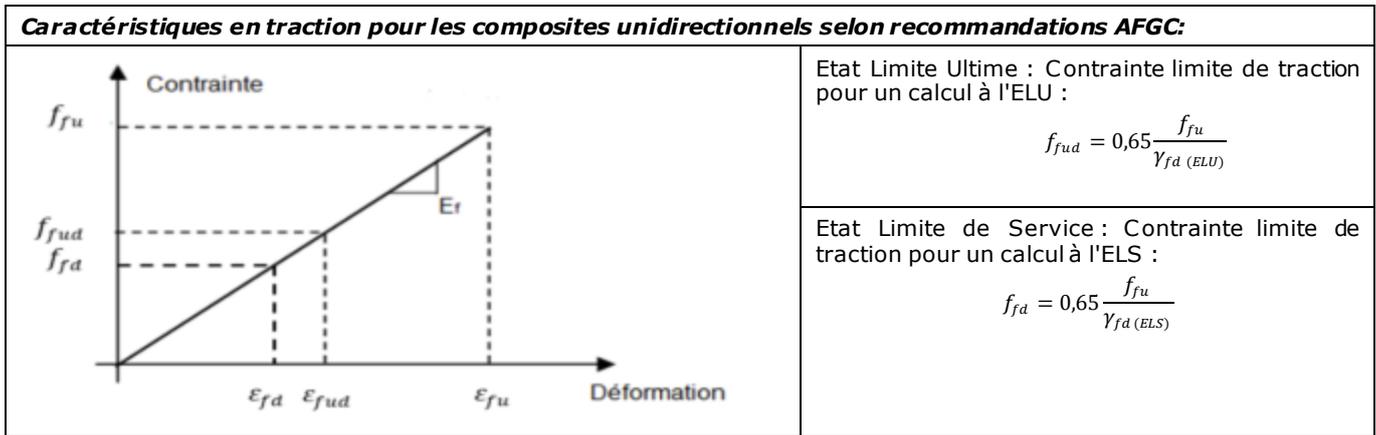
On utilise conventionnellement le diagramme ci-dessous :



**Loi de comportement des armatures de précontrainte selon BPEL 91 rev.99**

2.3.2.4. Composite

**2.3.2.4.1. Caractéristiques en traction des composites selon recommandations AFGC**



**Loi de comportement de composite**

La durabilité des renforcements est prise en compte par l'intermédiaire du coefficient 0,65 (effets liés au vieillissement des matériaux dans le temps).

- $f_{fu}$  : contrainte moyenne de traction à rupture du composite PRFC ;
- $\gamma_{fd}$  : coefficient partiel de sécurité, qui est fonction du type de PRFC et de l'Etat Limite considéré. Pour le composite Sika CarboDur® :
  - $\gamma_{fd}$ - 1,25 à ELU fondamental et  $\gamma_{fd}$ - 1 à ELU accidentel ;
  - $\gamma_{fd}$ - 1,4 à ELS.

Les caractéristiques de calcul des composites selon les recommandations AFGC sont données dans § 2.9.1.

**2.3.2.4.2. Caractéristiques en traction des composites selon recommandations TR-55**

Le TR55 tient compte d'une combinaison de coefficients de sécurité qui s'appliquent sur les valeurs caractéristiques des performances des composites afin de déterminer les valeurs de calcul. Le choix de ces coefficients est basé sur les propriétés suivantes :

- Matériau composite utilisé ;
- Méthode d'application/fabrication employée.

Les valeurs des coefficients partiels de sécurité pour le composite Sika CarboDur® sont données dans le tableau suivant :

| Composite PRFC              | $\gamma_{FRP,E}$ | $\gamma_{FRP,m}$ | $\gamma_{FRP,\epsilon}$ |
|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------------|
| Sika CarboDur® S, S NSM, BC | 1,1              | 1,05             | 1,25                    |

Avec :

- $f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_{FRP,mf}}$  - résistance de calcul du composite ;
- $E_{fd} = \frac{E_{fk}}{\gamma_{FRP,mE}}$  - module d'élasticité de calcul du composite ;
- $\epsilon_{fd} = \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_{FRP,m\epsilon}}$  - déformation de calcul du composite ;
- $f_{fk}$  - résistance caractéristique en traction du composite ;
- $E_{fk}$  - module d'élasticité caractéristique du composite ;
- $\epsilon_{fk}$  - déformation caractéristique du composite en traction ;

Et :

- $\gamma_{FRP,mE} = \gamma_{FRP,E} \cdot \gamma_{FRP,m}$  ;
- $\gamma_{FRP,m\epsilon} = \gamma_{FRP,E} \cdot \gamma_{FRP,m}$  ;
- $\gamma_{FRP,mf} = \gamma_{FRP,E} \cdot \gamma_{FRP,\epsilon} \cdot (\gamma_{FRP,m})^2$  ;
- $\gamma_{FRP,E}$  - coefficient partiel de sécurité sur le module d'élasticité du composite ;
- $\gamma_{FRP,m}$  - coefficient partiel de sécurité additionnel relatif au processus de fabrication du composite ;
- $\gamma_{FRP,\epsilon}$  - Coefficient partiel de sécurité sur la déformation du composite.

Les caractéristiques de calcul des composites selon TR-55 sont données dans § 2.9.1.

**2.3.3. 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.

Conformément aux recommandations de l'AFGC-2011, la contrainte limite de cisaillement de l'interface composite-béton pour le procédé Sika® CarboDur® est déterminée à partir des résultats d'essais de joint de colle à double recouvrement.

|  |          |
|--|----------|
| Contrainte moyenne de cisaillement à la rupture, $\tau_{ad,u}$   | 3 MPa    |
| Contrainte moyenne de cisaillement de l'interface à la limite de la linéarité élastique, $\tau_{ad,e}$ | 1,5 MPa  |
| Contrainte de cisaillement de calcul aux ELU, $V_{ad,ud}$  | 0,86 MPa |
| Contrainte de cisaillement de calcul aux ELS, $V_{ad,d}$   | 0,6 MPa  |

La contrainte limite de cisaillement de l'interface composite-béton ou de la colle est définie comme suit :

$$V_{ad} = \min \left( \alpha_{ad} * \frac{\tau_{ad,e}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{ctk}}{\gamma_{td}} \right)$$

Où :

$$\alpha_{ad} = 0,8 ;$$

$\tau_{ad,e}$  – la contrainte de cisaillement moyenne ;

$f_{ctk}$  – la résistance caractéristique à la traction du support béton. Elle devra être contrôlée in situ (pastillage), et ne devra pas être inférieure à 1,5 MPa.

Les valeurs de coefficients de sécurité  $\gamma_{ad}$  et  $\gamma_{td}$  sont données dans le tableau suivant :

|                   | $\gamma_{ad}$ |             |            | $\gamma_{td}$ |                           |
|-------------------|---------------|-------------|------------|---------------|---------------------------|
|                   | ELS           | ELU         |            | ELS           | ELU                       |
|                   |               | Fondamental | Accidentel |               | Fondamental et Accidentel |
| Sika® CarboDur® S | 2             | 1,4         | 1,1        | 1,5           | 1                         |

Les valeurs de la contrainte de cisaillement limite à retenir pour le dimensionnement sont calculées de la manière suivante :

$$V_{ad,d} = \min \left( \alpha_{ad} * \frac{\tau_{ad,e}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{ctk}}{\gamma_{td}} \right)$$

$$V_{ad,ud} = \min \left( \alpha_{ad} * \frac{\tau_{ad,e}}{\gamma_{ad}} ; \frac{f_{ctk}}{\gamma_{td}} \right)$$

et

$V_{ad,d}$  – contrainte de cisaillement de calcul aux ELS,

$V_{ad,ud}$  – contrainte de cisaillement de calcul aux ELU.

### 2.3.4. Interface composite/composite

La contrainte de cisaillement moyenne à l'interface composite/composite est déterminée par essai, conformément aux recommandations de l'AFGC - 2011, §1.10.2

|  |          |
|--|----------|
| Contrainte moyenne de cisaillement à l'interface composite/composite, $T_{fd}$ | 15,6 MPa |
| Contrainte de cisaillement de calcul aux ELU, $T_{f,ud}$                       | 8,9 MPa  |
| Contrainte de cisaillement de calcul aux ELS, $T_{f,dd}$                       | 6,24 MPa |

Les valeurs de la contrainte de cisaillement limite à retenir pour le dimensionnement sont calculées de la manière suivante :

$$T_{f,dd} = \left( \alpha_{ad} * \frac{T_{fd}}{\gamma_{ad,ELS}} \right),$$

$$T_{f,ud} = \left( \alpha_{ad} * \frac{T_{fd}}{\gamma_{ad,ELU}} \right)$$

et

$T_{f,dd}$  – contrainte de cisaillement de calcul aux ELS,

$T_{f,ud}$  – contrainte de cisaillement de calcul aux ELU.

### 2.3.5. Justification à la rupture

Cette justification doit être réalisée dans tous les cas hors situation incendie, 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)  $G + Q_1 + \sum \psi_{oi} Q_i$ , 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  $Q_{1r}$  y compris s'il y a lieu les charges climatiques et celles dues aux instabilités.

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

- $(R_1) \geq 0,63 (S_2)$ , dans le cas d'un élément principal, dont la rupture est susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (poutre porteuse, par exemple) ;
- $(R_1) \geq 0,50 (S_2)$ , 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 :

- $R_1$  : capacité résistante à l'ELU, en situation fondamentale, de l'élément non renforcé.
- $S_2$  : sollicitation agissante à l'ELU, en situation fondamentale, sur l'élément renforcé.

### 2.3.6. Dimensionnement en flexion du procédé Sika CarboDur® suivant les règles AFGC - BAEL / BPEL

#### 2.3.6.1. BAEL 91/99 - Renforcement en flexion du béton armé

##### 2.3.6.1.1. Vérification préalable de la structure

Avant renforcement, c'est-à-dire en tenant compte uniquement des armatures existantes en acier dans le béton armé et non de composite Sika CarboDur®, la structure doit reprendre la totalité des charges prévues (charges initiales et charges nouvelles) à l'E.L.U. sous combinaisons accidentelles, la résistance de calcul de l'armature en acier étant prise égale à la limite d'élasticité  $f_e$ .

##### 2.3.6.1.2. Dimensionnement à l'E.L.U.

Les composites Sika CarboDur® sont caractérisés par leurs résistances de calcul  $f_{fud}$  et par le diagramme de calcul linéaire.

On retient la valeur approchée du bras de levier - z :

$$z = d - 0,4 \cdot y_u$$

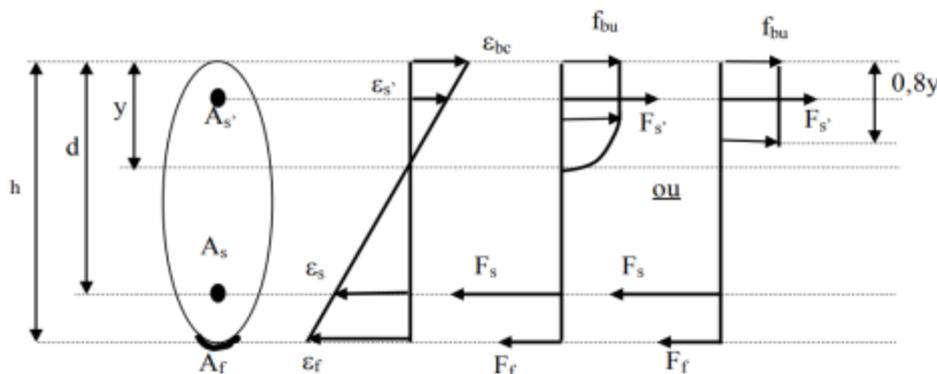


Diagramme de calcul d'une section

#### Nous notons :

- $M_u$  = moment ultime ;
- $M_{SOLL}$  = moment sous sollicitation à l'E.L.U. dans les cas courants ( $S = 1,35 G + 1,50 Q$ ) ;
- $b$  = largeur de la section ;
- $y_u$  = hauteur comprimée du diagramme rectangulaire.

Le moment résistant du béton s'exprime par :

$$M_u = 0,8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} \cdot (d - 0,4 \cdot y_u)$$

Comme  $M_u = M_{SOLL}$ , on peut calculer  $y_u$ . Cette dernière permet de déterminer l'effort dans le béton  $F_B$  :

$$F_B = 0,8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu}$$

Connaissant l'effort dans les armatures internes  $F_s = A_s \cdot f_{su}$ , l'équilibre  $F_B - F_s - F_f = 0$  conduit à la valeur de l'effort dans le composite Sika CarboDur® :

$$F_f = 0,8 \cdot b \cdot y_u \cdot f_{bu} - A_s \cdot f_{su}$$

La section de composite Sika CarboDur® à retenir doit donc être supérieure à la valeur  $\frac{F_f}{f_{fud}}$

$$A_f (mm^2) \geq \frac{F_f (N)}{f_{fud} (MPa)}$$

##### 2.3.6.1.3. Vérifications des contraintes à l'E.L.S.

On calcule l'état de contrainte dans les deux phases :

- Phase (1) avant renforcement :

Charge initiales permanentes appliquées à la structure ;

- Phase (2) après renforcement :

Nouvelles charges d'exploitation de la structure et éventuelles nouvelles charges permanentes.

On superpose les deux états de contraintes et on vérifie que les conditions définies ci-dessous pour une fissuration peu préjudiciable sous combinaison rare soient respectées :

- Béton  $\sigma_{b,lim}^{(1)} + \sigma_{b,lim}^{(2)} \leq 0,6 \cdot f_{c28}$
- Armatures acier
  - Fissuration peu préjudiciable  $\sigma_{s,lim}^{(1)} + \sigma_{s,lim}^{(2)} \leq f_e$
- Composite Sika CarboDur®  $\sigma_{f,lim} = \min\{f_{fd} ; 450 \text{ MPa}\}$

Avec

- $\sigma_{b,lim}^{(1)}$  et  $\sigma_{s,lim}^{(1)}$  - les contraintes dans le béton et les armatures avant renforcement ;
- $\sigma_{b,lim}^{(2)}$  et  $\sigma_{s,lim}^{(2)}$  - les contraintes dans le béton et les armatures après renforcement.

\*Dans les cas de fissuration préjudiciable ou très préjudiciable, la limite dans les aciers existants est celle définie dans les règles B.A.E.L. 91 :

Cas de la fissuration préjudiciable : la limitation prévue à l'article A.4.5.33 des Règles BAEL91 sous combinaison rare.

Cas de la fissuration très préjudiciable : la limitation prévue à l'article A.4.5.34 des Règles BAEL91 sous combinaison rare.

#### 2.3.6.1.4. Vérification du cisaillement de glissement en flexion

Cette condition est prépondérante dans le cas des structures faiblement armées ou fortement renforcées pour tenir compte du risque de délaminage aux points qui concentrent un effort tranchant et un moment fléchissant importants.

On doit vérifier que la contrainte de cisaillement  $\tau_u$  à l'interface entre le composite Sika CarboDur® et le béton n'excède pas la valeur de la contrainte limite de cisaillement  $V_{ad,ud}$  à l'ELU.

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_f \times 0,9 \times d} \cdot \frac{F_f}{F_f + F_s} \leq V_{ad,ud} \text{ avec :}$$

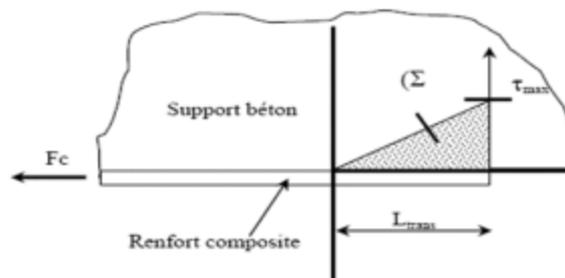
- $V_u$  : effort tranchant appliqué à la section,
- $F_f$  : effort de traction repris par le renfort PRFC Sika CarboDur® à l'ELU,
- $F_s$  : effort de traction repris par les armatures longitudinales à l'ELU,
- $b_f$  : largeur de lamelle Sika CarboDur®,
- $V_{ad,ud}$  : contrainte limite de cisaillement à l'ELU calculée selon §2.3.3

#### 2.3.6.1.5. Vérification du délaminage à l'extrémité du renfort PRFC Sika CarboDur®

La vérification du délaminage fait référence à celle proposée par les recommandations de l'AFGC (février 2011).

##### 2.3.6.1.5.1. Vérification à l'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 ( $\Sigma$  sur la figure ci-après). Soit  $F_{f,ELS}$  la valeur de cet effort.



#### Délaminage à l'extrémité du renfort

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

$$\tau_{max, ELS} = \frac{F_{f,ELS}}{b_f \times L_{anc,d}} \leq V_{ad,d}$$

**Avec :**

$L_{anc,d} = 20 \text{ cm}$  et  $b_f$  la largeur de lamelle Sika CarboDur®.

$V_{ad,d}$  = contrainte limite de cisaillement à l'ELS calculée selon §2.3.3.

##### 2.3.6.1.5.2. Vérification à l'ELU

On détermine l'épaisseur minimale de renfort nécessaire pour assurer la résistance en flexion à l'ELU de la section ( $\Sigma$ ). Soit  $t_{f,ELU}$  cette épaisseur.

Soit  $F_{f,ELU}$  l'effort ultime correspondant dans le renfort :

$$F_{f,ELU} = f_{fud} \cdot b_f \cdot t_{f,ELU} \text{ (pour un pivot D)}$$

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

$$\tau_{max\ ELU} = \frac{F_{f,ELU}}{b_f L_{anc,d}} \leq V_{ad,ud}$$

Avec :

- $l_{anc,d} = 20$  cm, et  $b_f$  la largeur de lamelle Sika CarboDur®.
- $V_{ad,ud}$  : contrainte limite de cisaillement à l'ELU calculée selon § 2.3.3.

### 2.3.6.2. BPEL 91/ rév. 99 – Renforcement en flexion du béton précontraint

#### 2.3.6.2.1. Préambule

Les principes de justifications sont identiques à ceux développés dans le cas du béton armé sauf en ce qui concerne les états limite de service en flexion :

Pour la justification à l'état limite de service, il y a lieu de limiter la contrainte de traction à  $0,8 \cdot f_{pk}$  dans les armatures de précontrainte (cas de la précontrainte adhérente) sous combinaison caractéristique.

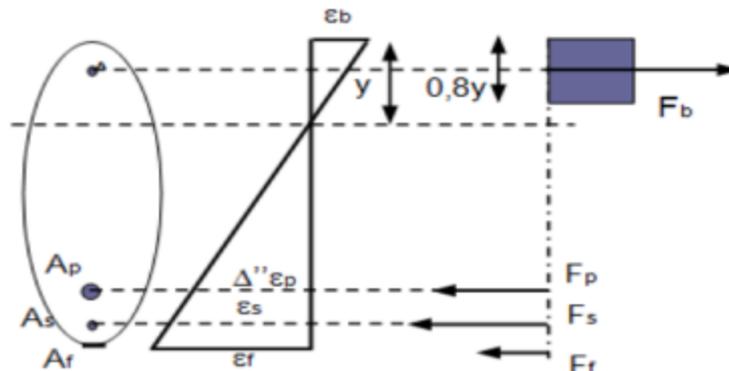
Dans tous les cas, il convient de s'assurer que, pour le renforcement en flexion des éléments en béton précontraint, la section d'enrobage soit complètement comprimée sous les combinaisons quasi permanentes.

BPEL 91 rév. 99 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).

#### 2.3.6.2.2. Vérification de la flexion à l'ELS

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



**Diagramme des déformations limites d'une section**

#### 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 : ( $f_{t,j}=0$ )

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

- Sous combinaisons rares :  $f_{t,j}$  dans la section d'enrobage ;  $1,5 \cdot f_{t,j}$  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 :

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

#### Contraintes normales admissibles dans les matériaux :

- Contrainte de compression du béton (toutes les classes) :  
 $0,6 \cdot f_{c,j}$  (ou  $0,5 \cdot f_{c,j}$  sous combinaisons quasi permanentes)
- Contrainte admissible pour les aciers passifs (classe III)

Sous combinaisons rares :

$$\xi = \min\left(\frac{2}{3} f_e ; \max(0,5 \cdot f_e ; 110 \sqrt{\eta \cdot f_{tj}})\right)$$

- Avec :
  - $\xi$  la contrainte limite en traction des armatures ;
  - $\eta$  le coefficient de fissuration des armatures passives (1,0 pour les ronds lisses, 1,6 pour les armatures HA).

Sous combinaisons fréquentes :  $0,35 f_e$

- Contrainte admissible pour les aciers de précontrainte (Classe III) :

Sous combinaisons rares, la surtension dans les armatures de précontrainte est limitée à :

- $0,1 f_{prg}$  pour la précontrainte adhérente par post-tension
- $\min\{0,1 f_{prg} ; 150 \eta_p\}$  pour la précontrainte par pré-tension

Avec :

- $f_{prg}$  la charge maximale à la rupture des armatures de précontrainte rapportée à la section nominale ;
- $\eta_p$  le coefficient de fissuration des armatures de précontrainte (1,3 pour les torons et 1 pour les fils autres que ronds et lisses)

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

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

- Pour le composite Sika CarboDur® :  $\sigma_f < \sigma_{lim}$  et  $\sigma_{lim} = \min\{f_{fd} ; 450 \text{ MPa}\}$

#### **Section minimale des renforts Sika CarboDur® :**

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 :

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

Avec

- $B_t$  : aire de la partie du béton tendu ;
- $\sigma_{lim}$  : contrainte de traction admissible à l'ELS ;
- $N_{Bt}$  : résultante des contraintes de traction ;
- $\sigma_{Bt}$  : valeur absolue de la contrainte maximale de traction.

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

$A_s$  et  $A_p$  étant respectivement la section des armatures passives et la section des armatures de précontrainte pré-tendues, dont la distance au parement en traction est inférieure à 5 cm ou les 2/3 de la hauteur du béton tendu.

#### **2.3.6.2.3. Vérification de la flexion à l'ELU**

Effort dans le béton :

$$F_b = 0,8 y_u \cdot b \cdot f_{bu}$$

Effort dans l'acier passif :

$$F_s = A_s \cdot f_{su}$$

Effort dans l'acier actif :

$$F_p = A_p \cdot E_p \cdot \Delta \cdot \frac{\varepsilon_p}{\gamma_p}$$

Avec  $\gamma_p = 1,15$

Effort dans le composite Sika CarboDur® :

$$F_f = A_f \cdot E_f \cdot \frac{\varepsilon_{fu}}{\gamma_{fd}}$$

Avec  $\gamma_{fd} = 2$

A partir de la géométrie de la structure et des efforts dans les matériaux, vérifier que le moment sollicitant reste inférieur au moment résistant de la section.

#### **2.3.7. Dimensionnement en flexion du procédé Sika CarboDur® suivant le référentiel TR55 (Eurocode 2)**

##### **2.3.7.1. Généralités**

Les hypothèses de calcul retenues sont :

- Les sections planes restent planes, et il n'y a pas de glissement relatif entre les armatures internes ou le renfort Sika CarboDur® et le béton ;
- La résistance en traction du béton est négligée ;
- La résistance en compression du renfort Sika CarboDur® est négligée ;
- Les diagrammes contrainte – déformation de calcul du béton, de l'acier passif et de précontrainte et du composite, considérés sont ceux du paragraphe 2.3.2;

- Les combinaisons de charges sur les structures, les lois de comportement et les coefficients de sécurité sur l'acier et le béton sont ceux donnés par l'Eurocode 2.

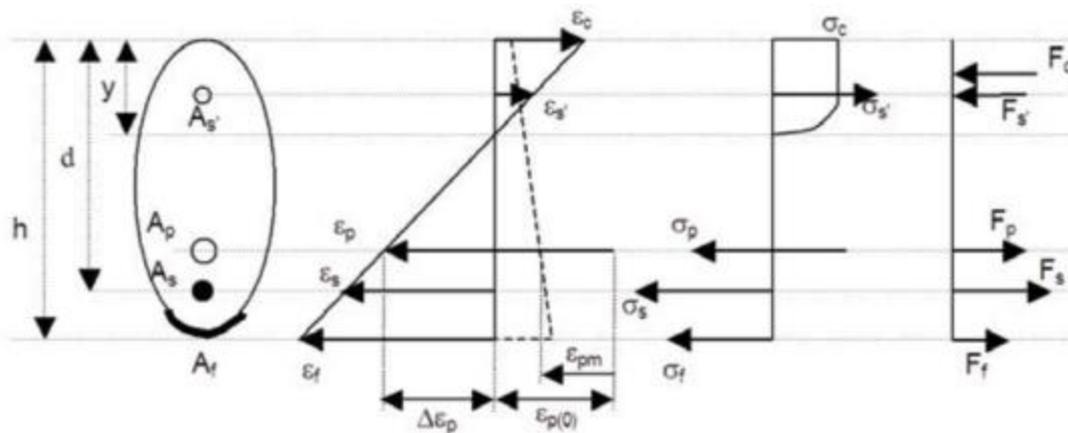
## 2.3.7.2. Notations

| Béton                      |  |
|----------------------------|--|
| $b$                        | Largeur de l'élément béton   |
| $f_{ck}$                   | Résistance caractéristique du béton en compression   |
| $f_{cd}$                   | Résistance de calcul du béton en compression   |
| $f_{ctk}$                  | Résistance caractéristique du béton en traction  |
| $\varepsilon_c$            | Déformation du béton   |
| $\varepsilon_{c2}$         | Déformation du béton atteinte pour la contrainte de compression maximale   |
| $\varepsilon_{cu2}$        | Déformation ultime du béton en compression   |
| $\sigma_c$                 | Contrainte de compression du béton   |
| $\alpha_{cc}$              | Coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance en compression et des effets défavorables résultant de la manière dont la charge est appliquée |
| $\gamma_c$                 | Coefficient partiel de sécurité du béton   |
| $M_{Rd}$                   | Moment résistant de la section béton armé  |
| $M_{Ed}$                   | Moment ultime de calcul  |
| $M_y$                      | Moment de la section renforcée pour lequel les armatures atteignent leur limite élastique  |
| Acier                      |  |
| $A_s$                      | Section d'armatures  |
| $f_{yk}$                   | Résistance caractéristique des armatures en traction   |
| $f_{yd}$                   | Résistance de calcul des armatures   |
| $d$                        | Distance entre les aciers de traction et la fibre supérieure du béton  |
| $\varepsilon_s$            | Déformation des armatures  |
| $\sigma_s$                 | Contrainte de traction des armatures   |
| $E_s$                      | Module d'élasticité des armatures  |
| $\gamma_s$                 | Coefficient partiel de sécurité de l'acier   |
| $z$                        | Bras de levier   |
| Composite                  |  |
| $A_f$                      | Section du renfort carbone   |
| $b_f$                      | Largeur du composite   |
| $f_{fk}$                   | Résistance caractéristique du composite en traction  |
| $f_{fd}$                   | Résistance de calcul du composite en traction  |
| $E_{fk}$                   | Module d'élasticité caractéristique du composite   |
| $E_{fd}$                   | Module d'élasticité de calcul du composite   |
| $\varepsilon_{fk}$         | Déformation caractéristique du composite en traction   |
| $\varepsilon_{fd}$         | Déformation de calcul du composite en traction   |
| $\varepsilon_{mt}$         | Déformation maximale du composite dans la zone élastique   |
| $\varepsilon_{fmax}$       | Déformation du composite au moment ultime de calcul  |
| $\gamma_{FRP,E}$           | Coefficient partiel de sécurité sur le module d'élasticité du composite  |
| $\gamma_{FRP,m}$           | Coefficient partiel de sécurité additionnel relatif au processus de fabrication du composite   |
| $\gamma_{FRP,\varepsilon}$ | Coefficient partiel de sécurité sur la déformation du composite  |
| $M_{add}$                  | Moment additionnel   |
| $\sigma_{fmax}$            | Contrainte dans le composite au moment ultime de calcul  |
| $\sigma_{fy}$              | Contrainte dans le composite pour laquelle les armatures atteignent leur limite élastique  |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| $t_f$                     | Epaisseur du composite   |
| Interface composite/béton |  |
| $k_b$                     | Coefficient sur la force de collage  |
| $l_t$                     | Longueur d'ancrage   |
| $l_{t,max}$               | Longueur d'ancrage maximale  |
| $T_d$                     | Effort dans le composite   |
| $T_k$                     | Effort de décollement  |
| $T_{k,max}$               | Effort maximal de décollement  |
| $\tau_t$                  | Contrainte de cisaillement longitudinale dans le composite   |
| $\tau_{lim,y}$            | Contrainte de cisaillement limite  |
| $\tau_m$                  | Contrainte moyenne de cisaillement   |
| $\tau_{sc}$               | Contrainte additionnelle de cisaillement   |
| $\Delta x$                | Longueur entre la position du moment maximum et le moment pour lequel les armatures atteignent leur limite élastique |

### 2.3.7.3. Renforcement en flexion du béton armé

La section doit être calculée de façon que la plastification des armatures en place précède la rupture par compression du béton et la rupture en traction du composite.



**Diagramme des déformations limites d'une section**

#### 2.3.7.3.1. Dimensionnement à l'ELU

Une estimation de la section de renfort composite nécessaire peut être obtenue en considérant que la position de l'axe neutre reste approximativement égale à celui de la section non renforcée.

$$A_f = \frac{M_{add}}{\epsilon_{fe} E_{fd} z}$$

Avec :

- $M_{add}$  : moment additionnel ( $M_{Ed} - M_{Rd}$ );
- $\epsilon_{fe}$  : déformation de calcul du composite égale  $\min\left\{\frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_{FRP,m\epsilon}}; 0,008\right\}$  ;
- $E_{fd}$  : module d'élasticité de calcul du composite ;
- $z$  : bras de levier des armatures tendues.

#### 2.3.7.3.2. Calcul du moment résistant de la section renforcée

- Les sections de béton et de composite considérées restent planes sous l'effet des déformations. On considère également qu'il n'y a pas de glissement/cisaillement entre différentes sections du même élément.
- Les contraintes dans le béton sont déterminées suivant le diagramme parabolique-rectangle.
- L'effort de traction dans le béton n'est pas pris en compte.
- Les contraintes dans les armatures sont déterminées à partir du diagramme bilinéaire simplifié.
- Les déformations dans la section doivent tenir compte des déformations présentes dans la structure existante au moment de l'application du renfort.
- Les contraintes dans le renfort carbone suivent une loi contrainte-déformation linéaire jusqu'à la rupture.

De plus, si le moment résistant de la section renforcée est inférieur à 1,15 fois le moment sollicitant ( $M_{Rd,renf} \leq 1,15 M_{Ed}$ ), il convient de vérifier que la déformation au centre de gravité des armatures tendues respecte la condition suivante :

$$\varepsilon_s \geq 0,002 + \frac{f_{yk}}{E_s \gamma_s}$$

Si cette condition n'est pas respectée, il est nécessaire d'augmenter la section de renfort  $A_f$ .

### 2.3.7.3.3. Vérifications section renforcée

Le principe de calcul pour déterminer le moment résistant de la section renforcée est le suivant :

- (a) calculer les déformations initiales dans la structure à l'état initial, c'est-à-dire au moment des travaux de renforcement ;
- (b) calculer les charges appliquées à la structure à l'ELU et déterminer le moment sollicitant  $M_{Ed}$  ;
- (c) estimer la section de renfort carbone nécessaire (voir § 2.3.7.3.1) ;
- (d) supposer une valeur initiale pour la déformation maximale dans le béton ( $\leq \varepsilon_{cu2}$  ou  $\varepsilon_{cu3}$  suivant le diagramme contrainte-déformation utilisé selon l'Eurocode 2) ;
- (e) supposer une position initiale pour l'axe neutre ;
- (f) en tenant compte des recommandations initiales (voir §2.3.7.3.2), calculer les forces dans la section à renforcer. Le calcul est basé sur un profil de déformation linéaire dans lequel la déformation dans le composite tient compte de la déformation initiale dans le béton.
- (g) itérativement, ajuster la position de l'axe neutre jusqu'à l'équilibre des forces dans la section.
- (h) vérifier les contraintes et les déformations par rapport aux critères suivants :
  - La déformation maximale dans le béton ne doit pas dépasser  $\varepsilon_{cu2}$  ou  $\varepsilon_{cu3}$  suivant le diagramme contrainte-déformation utilisé selon l'Eurocode 2 ;
  - La contrainte de cisaillement longitudinale  $\tau_t$  dans le composite ne doit pas dépasser la contrainte de cisaillement limite  $\tau_{lim,y}$  ;
  - La déformation dans le composite  $\varepsilon_{m\tau}$  doit être inférieure à sa déformation de calcul  $\varepsilon_{fd}$ .

Si les contraintes et déformations dans le composite dépassent les valeurs limites, répéter le calcul en ajustant la position de l'axe neutre (étape « e »). Dans ce cas, le béton n'atteindra pas sa déformation limite ( $\varepsilon_{cu2}$  ou  $\varepsilon_{cu3}$ ) car la déformation maximale du composite et la profondeur de l'axe neutre régulent le calcul. (Ne pas utiliser le diagramme rectangle simplifié pour le béton, seulement valide si le béton atteint sa déformation ultime).

- (i) calculer le moment résistant de la section renforcée et vérifier qu'il est supérieur au moment sollicitant. Dans le cas contraire, repartir de l'étape « d » en augmentant la valeur de la déformation maximale dans le béton.

### 2.3.7.3.4. Vérifications à l'ELS

Une fois le processus itératif pour le calcul du renforcement à l'ELU terminé, il convient de vérifier les contraintes admissibles dans les matériaux à l'ELS.

#### Pour le béton :

- $\sigma_c \leq \sigma_{c,lim} = 0,6 f_{ck}$ , sous combinaison caractéristique ;
- $\sigma_c \leq \sigma_{c,lim} = 0,45 f_{ck}$ , sous combinaison quasi permanente.

#### Pour les armatures tendues :

- $\sigma_s \leq \sigma_{s,lim} = 0,8 f_{yk}$ , sous combinaison caractéristique.

#### Pour les renforts PRFC :

- $\sigma_f \leq \sigma_{f,lim} = \min(0,9\sigma_{s,lim} ; 0,65 f_{fd})$ , sous combinaison caractéristique ( $f_{fd}$  la résistance ultime du composite définie au §2.3.2.4.2 du Dossier Technique).

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

### 2.3.7.3.5. Vérification de la contrainte de cisaillement longitudinale

On doit vérifier que la contrainte de cisaillement longitudinale dans le composite est inférieure à la contrainte de cisaillement limite :

$$\tau_t \leq \tau_{lim,y}$$

Avec la contrainte de cisaillement limite :

$$\tau_{lim,y} = \min \left[ 4,5 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} ; 2 \text{ MPa} \right]$$

Et la contrainte de cisaillement longitudinale dans le composite défini comme :

$$\tau_t = \tau_m + \tau_{sc}$$

Où :

- $\tau_m = t_f \left[ \frac{\sigma_{f,max} - \sigma_{fy}}{\Delta x} \right]$  : contrainte moyenne de cisaillement.
- $\tau_{sc} = 7,8 \left[ 1,1 - \frac{M_y}{M_{Ed}} \right] f_{ctk}$  : contrainte additionnelle de cisaillement.

Avec :

- $M_y$  : moment de la section renforcée pour lequel les armatures atteignent leur limite élastique ;

- $\sigma_y$  : contrainte dans le composite pour laquelle les armatures atteignent leur limite élastique ;
- $M_{Ed}$  : moment maximal de calcul ;
- $\sigma_{fmax}$  : contrainte dans le composite au moment maximal de calcul ;
- $\Delta x$  : distance entre les sections correspondant à  $M_y$  et à  $M_{Ed}$ .

### 2.3.7.3.6. Vérification de la déformation du composite

On doit vérifier que la déformation maximale du composite dans la zone élastique est inférieure à la déformation ultime de calcul du composite :

$$\varepsilon_{mt} \leq \varepsilon_{fd}$$

Avec la déformation ultime de calcul du composite donnée par :

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{FRP,mE}}$$

Et la déformation maximale du composite dans la zone élastique définie comme :

$$\varepsilon_{mt} = \varepsilon_{fmax} + 0,114 \frac{\tau_{sc}}{\sqrt{E_{fd} t_f}}$$

Où :

- $\varepsilon_{fmax}$  : déformation du composite au moment fléchissant maximal, calculée à l'ELU (il y a lieu de vérifier que cette déformation soit toujours inférieure à 0,008) ;
- $\tau_{sc}$  : contrainte additionnelle de cisaillement (§2.3.7.3.5) ;
- $E_{fd} = \frac{E_{fk}}{\gamma_{FRP,mE}}$  : module d'élasticité de calcul du composite ;
- $t_f$  : épaisseur du composite.

### 2.3.7.3.7. Vérification de l'ancrage Sika CarboDur® collé en surface

Lorsque le composite s'applique sur la totalité de la portée (d'appui à appui), il existe une longueur d'ancrage maximale  $l_{t,max}$  qui permet la reprise de tous les efforts de décollement  $T_{k,max}$  aux extrémités de renfort.

- $T_{k,max} = 0,5 k_b b_f \sqrt{E_{fd} t_f f_{ctk}}$  : effort maximal de décollement ;
- $l_{t,max} = 0,7 \sqrt{\frac{E_{fd} t_f}{f_{ctk}}}$  : longueur d'ancrage maximale (correspondant à  $T_{k,max}$ ).

Avec :

- $E_{fd} = \frac{E_{fk}}{\gamma_{FRP,mE}}$  : module d'élasticité de calcul du composite en MPa.
- $t_f$  : épaisseur du composite en mm.
- $b_f$  : largeur du composite en mm ;
- $k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}}$  : coefficient sur la force de collage.
- $b$  : largeur de l'élément à renforcer en mm.

Il convient donc de vérifier que l'effort transmis par collage  $T_d$  est inférieur à l'effort maximal de décollement  $T_{k,max}$  :

$$T_d \leq T_{k,max}$$

Dans le cas où la longueur du renfort souhaite être optimisée sur la portée, il est nécessaire de calculer les positions pour lesquelles le moment fléchissant  $M_{Ed}$  n'excède plus le moment résistant  $M_{Rd}$ . La longueur d'ancrage sera d'au moins 50 cm de part et d'autre de ces positions. Il sera toutefois nécessaire de vérifier que l'effort  $T_d$  sont transmis sur la longueur  $l_{t,max}$ .

Dans le cas où la longueur d'ancrage  $l_{t,max}$  n'est pas disponible, l'effort maximal de décollement  $T_{k,max}$  doit être réduit à la valeur  $T_d$  correspondant à la longueur d'ancrage disponible  $l_t$ .

Avec la valeur de l'effort transmis par collage est donnée par :

$$T_k = \left( T_{k,max} \frac{l_t}{l_{t,max}} \right) \left( 2 - \frac{l_t}{l_{t,max}} \right)$$

Où :

$l_t$  : longueur d'ancrage disponible en mm.

Il convient de vérifier que l'effort transmis par collage  $T_d$  est inférieur à l'effort de décollement  $T_k$  ramené à la longueur d'ancrage disponible  $l_t$

$$T_d \leq T_k$$

### 2.3.7.3.8. Principe de dimensionnement de mèche d'ancrage SikaWrap® FX-50C

Le dimensionnement de mèche d'ancrage SikaWrap® FX-50C (nombre de mèches, espacement des mèches, ...) est réalisé à partir des efforts de calcul admissible aux ELU en fonction des efforts sollicitants à reprendre voir §2.3.7.3.7. L'ancrage total des composites Sika® CarboDur® collés en surface sera repris par la ou les mèche(s).

### 2.3.7.4. Vérifications particulières Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC

Dans le cadre de l'utilisation de renforts engravés, il est nécessaire de procéder aux vérifications de contrainte de cisaillement et de déformation du composite. Concernant la longueur d'ancrage, il convient aussi de vérifier la rupture dans le béton, dans la couche d'adhésif ainsi que dans la zone d'enrobage du béton.

#### 2.3.7.4.1. Vérification du décollement des barres induit par les contraintes de cisaillement longitudinales

##### 2.3.7.4.1.1. Rupture à l'interface adhésif / béton

On doit vérifier que la contrainte de cisaillement à l'interface adhésif / béton est inférieure à la contrainte de cisaillement limite de cette interface :

$$\tau_{conc} \leq \tau_{lim,c}$$

Avec la contrainte de cisaillement à l'interface adhésif / béton défini par l'équation :

$$\tau_{conc} = \frac{A_f}{b_{notchperim}} \left( \frac{\Delta\sigma_f}{\Delta y} \right)$$

Où :

- $A_f$  : section de composite NSM ;
- $b_{notchperim}$  : périmètre effectif de rainure, calculé comme étant 1x largeur minimale plus 1x profondeur minimale ;
- $\Delta y$  : petite distance entre deux sections consécutives le long de l'élément ;
- $\Delta\sigma_f$  : modification de la contrainte dans la barre engravée le long de  $\Delta y$ .

Et la contrainte de cisaillement limite de l'interface adhésif / béton donnée par :

$$\tau_{lim,c} = \min \left[ 0,8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}; 2 \text{ MPa} \right]$$

Où :

$f_{ctk}$  Résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5% ;  
 $\gamma_c = 1,2$  coefficient partiel relatif au béton, pour les situations accidentelles ;  
 $\gamma_c = 1,5$  coefficient partiel relatif au béton, dans les autres cas.

##### 2.3.7.4.1.2. Rupture à l'interface barre engravée / adhésif

On doit vérifier que la contrainte de cisaillement à l'interface barre engravée-adhésive est inférieure à la contrainte de cisaillement limite de cette interface :

$$\tau_{ad} \leq \tau_{ad,lim}$$

Avec la contrainte de cisaillement à l'interface barre engravée-adhésif défini par l'équation :

$$\tau_{ad} = \frac{A_f}{b_{barperim}} \left( \frac{\Delta\sigma_f}{\Delta y} \right)$$

Où :

- $A_f$  : section de composite NSM ;
- $b_{barperim}$  : périmètre du composite NSM ;
- $\Delta y$  : petite distance entre deux sections consécutives le long de l'élément ;
- $\Delta\sigma_f$  : modification de contrainte dans le composite engravé le long de  $\Delta y$ .

Et la contrainte de cisaillement limite de l'interface barre engravée-adhésif donnée par :

$$\tau_{ad,lim} = 0,8 \frac{f_{at}}{\gamma_A}$$

Où :

- $f_{at}$  : résistance caractéristique en traction de l'adhésif structural, déterminée selon l'EN 1504-4. La résistance minimale en traction des adhésives Sikadur® est supérieure à 27 MPa (à 7 jours à +23°C). Par sécurité, on prendra une résistance caractéristique  $f_{at}$  de  $27 / 1,2 = 22,5$  MPa ;
- $\gamma_A = 4$  : coefficient partiel de sécurité pour l'adhésif structural.

#### 2.3.7.4.2. Vérification de l'ancrage

##### 2.3.7.4.2.1. Rupture dans le béton

Pour éviter la rupture par cône de béton, la force d'ancrage ultime maximale,  $T_{nsm,max}$  et longueur d'ancrage maximale correspondante  $l_{nsm,max}$  doivent être vérifiées selon les équations :

$$T_{nsm,max} = 10 b_{notchperim} \sqrt{E_{fd} A_f f_{ctk}}$$

$$l_{nsm,max} = 0.135 b_{notchperim} \sqrt{\frac{E_{fd} A_f}{f_{ctk}}}$$

Où :

- $b_{notchperim}$  : périmètre effectif de rainure, calculé comme étant 1x largeur minimale plus 1x profondeur minimale ;
- $E_{fd}$  : module d'élasticité de calcul de composite NSM exprimé en GPa ;
- $A_f$  : section de composite NSM ;
- $f_{ctk}$  : Résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5%.

Si la longueur d'ancrage maximale  $l_{nsm,max}$  n'est pas disponible ou nécessaire  $l_{nsm} \leq l_{nsm,max}$ , la force d'ancrage développée par la longueur d'ancrage disponible  $l_{nsm}$  est calculée selon l'équation :

$$T_{nsm} = T_{nsm,max} \frac{l_{nsm}}{l_{nsm,max}} \left( 2 - \frac{l_{nsm}}{l_{nsm,max}} \right)$$

#### 2.3.7.4.2.2. Rupture dans l'adhésif

On doit vérifier que la force exercée par la barre engravée est inférieure à la force caractéristique de rupture de l'adhésif :

$$T_{nsm,ad} = 0,3 f_{at} b_{barperim} l_{nsm}$$

- $b_{barperim}$  : périmètre du composite NSM ;
- $f_{at}$  : résistance caractéristique en traction de l'adhésif structural, déterminée selon l'EN 1504-4. La résistance minimale en traction des adhésives Sikadur® est supérieure à 27 MPa (à 7 jours à +23°C). Par sécurité, on prendra une résistance caractéristique  $f_{at}$  de 27/ 1,2 = 22,5 MPa ;
- $l_{nsm}$  : longueur d'ancrage disponible.

#### 2.3.7.4.2.3. Rupture dans la zone d'enrobage du béton

On doit vérifier que la force exercée par la barre engravée est inférieure à la limite de rupture dans la zone d'enrobage du béton selon l'équation :

$$T_{nsm,lim} = 38 \sqrt{\frac{b}{n_{nsm}}} (E_{fd} A_f f_{ctk}) \leq A_f \cdot f_{fd} = T_{ul}$$

Où :

- $n_{nsm}$  est le nombre de barres engravées mises en place ;
- $E_{fd}$  est le module d'élasticité de calcul de composite NSM exprimé en GPa ;
- $b$  est la largeur de la section à renforcer. Dans le cas de renforcement d'une dalle, le rapport  $\frac{b}{n_{nsm}}$  correspond à l'espacement axe à axe entre les renforts ;
- $f_{ctk}$  : résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5% ;
- $A_f$  : section de composite NSM ;
- $f_{fd}$  : résistance de calcul de composite NSM ;
- $T_{ul}$  : effort ultime reprise par composite NSM.

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

Contrairement au renforcement de structures en béton armé, l'Etat Limite de Service (ELS) gouverne le dimensionnement des renforts pour les structures en béton précontraint.

La procédure pour le calcul du renforcement est la même que celle pour les éléments en béton armé.

Il faut néanmoins indiquer la précontrainte des armatures  $f_{se}$  à l'état initial (au moment des travaux de renforcement) en tenant compte de toutes les pertes. La force de précontrainte résultante  $P_p$  et la part isostatique du moment de précontrainte  $M_p$  sont déterminées.

##### 2.3.7.5.1. Critère à l'Etat Limite de Service

En supposant les armatures précontraintes dans la zone tendue, les contraintes dans la section béton seront données par la superposition des contraintes avant et après renforcement, en considérant un comportement élastique :

$$\sigma_{conc,t,b} = \frac{P_{m,t}}{A_c} + \frac{P_{m,t} e y_{t,b}}{I_c} \pm \frac{M_{existing} y_{t,b}}{I_c} \pm \frac{M_{add,service} y_{trans,t,b}}{I_{trans}}$$

Avec :

- $\sigma_{conc,t,b}$  : contraintes maximales dans le béton (traction ou compression) à la fibre la plus tendue ou la plus comprimée ;
- $P_{m,t}$  : force de précontrainte au moment des travaux de renforcement ;
- $A_c$  : aire de la section béton ;
- $e$  : excentricité des tendons précontraints par rapport au centre de gravité de la section ;
- $y_{t,b}$  : distance du centre de gravité de la section à la fibre la plus tendue ou la plus comprimée ;
- $I_c$  : inertie de la section béton ;
- $M_{existing}$  : moment dans la section au moment des travaux de renforcement ;
- $M_{add,service}$  : moment additionnel après renforcement est (ELS) ;
- $y_{trans,t,b}$  : distance du centre de gravité de la section renforcée à la fibre la plus tendue ou plus comprimée ;

- $I_{trans}$  : inertie de la section renforcée.

Il convient de vérifier ensuite que les contraintes dans les matériaux ne dépassent pas leur valeur limite.

Pour le béton :

- •  $\sigma_c \leq \sigma_{c,lim} = 0,6 f_{ck}$ , sous combinaison caractéristique ;
- •  $\sigma_c \leq \sigma_{c,lim} = 0,45 f_{ck}$ , sous combinaison quasi permanente ;

Pour les armatures BA tendues :

- •  $\sigma_s \leq \sigma_{s,lim} = 0,8 f_{yk}$ , sous combinaison caractéristique ;

Pour les armatures de précontrainte :

- •  $\sigma_s \leq \sigma_{s,lim} = 0,8 f_{pk}$ , sous combinaison caractéristique ;

Pour les renforts PRFC :

- •  $\sigma_f \leq \sigma_{f,lim} = \min(0,9 \sigma_{s,lim} ; 0,65 f_{fd})$  sous combinaison caractéristique ( $f_{fd}$  la résistance ultime du composite définie au §2.3.2.4.2 du Dossier Technique.

Augmenter la section du matériau composite si nécessaire.

### 2.3.7.5.2. Ancrage

Les éléments en béton précontraint ne sont généralement pas fissurés dans la zone proche de l'appui, le matériau composite pour le renforcement doit être toujours ancré au-delà de la dernière fissure de flexion. La vérification de l'ancrage se fait à la position où le moment agissant atteint le moment de fissuration de la section.

---

## 2.4. Dispositions de mise en œuvre

---

### 2.4.1. Généralités

Le bon fonctionnement d'une réparation ou d'un renforcement par les procédés Sika CarboDur® exige un support de bonne qualité.

Dans tous les cas, conformément à la norme NF EN 1504-10, la réalisation d'un diagnostic global de la structure, et en particulier des éléments à renforcer, par un organisme spécialisé est essentiel.

Il s'agit de déterminer notamment l'état du béton (résistance interne et cohésion superficielle, carbonatation, présence de chlorures, ...), l'état des armatures (section et positionnement, état de corrosion). Ces informations importantes influent sur le calcul des renforts PRFC.

Tous les produits qui seront mis en œuvre ultérieurement doivent être conservés dans les conditions de stockage mentionnées dans les Notices Produits.

La mise en œuvre doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans le présent Avis Technique, notamment pour ce qui concerne les travaux de nettoyage et 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.

Le personnel de l'entreprise mettant en œuvre le procédé doit justifier d'une formation spécifique à ce type de renforcement par le service technique de Sika.

### 2.4.2. Dispositions constructives

Le renforcement structural d'un ouvrage existant doit faire suite à un diagnostic préalable (détermination des capacités résistantes) aussi précis que possible, permettant de dimensionner et de mettre en œuvre les renforcements de manière pertinente. Le dimensionnement du renforcement doit être réalisé par un bureau d'études de structure spécialisé.

#### 2.4.2.1. Nombre de lamelles Sika CarboDur® à coller en surface à superposer

Lorsque la place disponible est limitée (exemple en sous-face de poutre) il est possible de superposer les lamelles.

Le nombre maximum de couches superposées dépend de la qualité et de la contrainte limite en cisaillement du support en béton. Voir les vérifications présentées dans § 2.3.3.

#### 2.4.2.2. Arrêt de composite

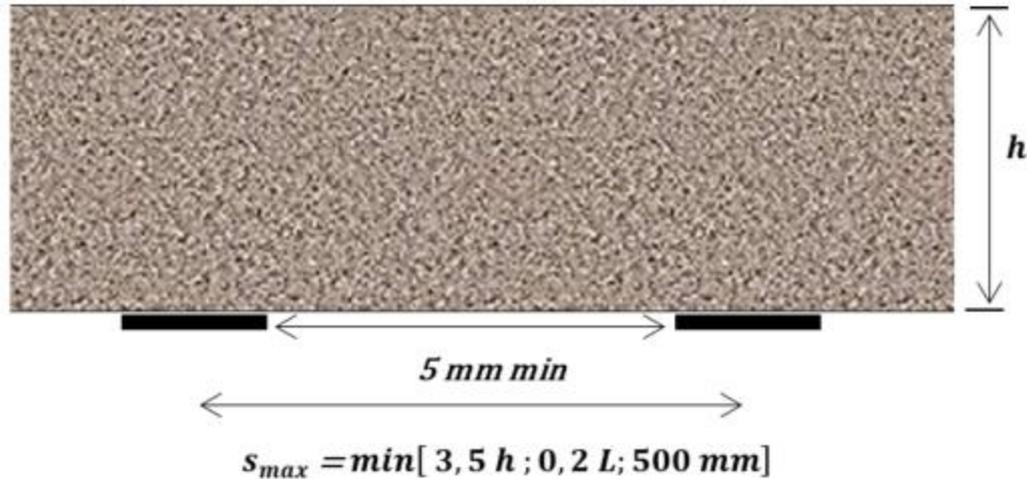
Au-delà de la zone sollicitée et renforcée en flexion, le composite Sika CarboDur® doit être prolongé d'une longueur d'ancrage minimale de 50 cm. Cette longueur d'ancrage peut être réhaussée après vérification de calcul (voir §2.3.7.3.7). La plus grande des deux valeurs doit être prise en compte.

#### 2.4.2.3. Espacement entre les composites Sika CarboDur® à coller en flexion

Les renforts doivent être uniformément répartis le long de la dalle ou de la poutre. Les espacements maximaux entre les renforts à la flexion à coller sont calculés conformément au §9.3.1.1(3) de la norme NF EN 1992-2 en précisant notamment les définitions des hauteurs efficaces et ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes (voir figure ci-dessous) :

- 20 % de la portée  $L$  (40 % de la longueur pour une console) ;
- 3,5 fois l'épaisseur de dalle  $h$  ;
- 500 mm.

Dans le cas de la juxtaposition de deux ou plusieurs lamelles, prévoir un espace libre d'au moins 5 mm entre celles-ci afin de permettre l'évacuation de l'excès de colle ou de bulles d'air lors du marouflage.



**Dispositions constructives composites Sika® CarboDur® à coller T**

2.4.2.4. Espacement entre les composites Sika CarboDur® à engraver en flexion

Lorsque des saignées sont découpées dans l'enrobage pour installer les systèmes Sika CarboDur® à insérer dans l'enrobage, il convient que ceux-ci soient placés de sorte à ne pas compromettre l'enrobage, en tenant compte de la précision de l'équipement ainsi que de la tolérance adéquate sur la mise en place.

Les limites géométriques des rainures et les distances par rapport à l'arête ainsi que l'espacement [en mm], des barres à engraver doivent être conformes aux exigences suivantes :

La largeur des rainures  $b_{slot}$  [mm] :

- $t_f + 4\text{ mm} \leq b_{slot} \leq t_f + 8\text{ mm}$ , où  $t_f$  – est l'épaisseur de la barre rectangulaire à engraver Sika CarboDur® S NSM en mm ;
- $\phi_s + 4\text{ mm} \leq b_{slot} \leq \phi_s + 8\text{ mm}$ , où  $\phi_s$  – est le diamètre de la barre circulaire à engraver Sika CarboDur® BC en mm ;

La profondeur des rainures  $t_{slot}$  [mm] :

- $b_f + 4\text{ mm} \leq t_{slot} \leq c_w - 5\text{ mm}$ , où  $b_f$  – est la largeur de la barre rectangulaire à engraver Sika CarboDur® S NSM en mm et  $c_w$  – enrobage de béton des armatures d'effort tranchant ;
- $\phi_s + 4\text{ mm} \leq t_{slot} \leq c_w - 5\text{ mm}$ , où  $\phi_s$  – est le diamètre de la barre circulaire à engraver Sika CarboDur® BC en mm et  $c_w$  – enrobage de béton des armatures d'effort tranchant ;

Entraxe  $s_f$  min [mm]

- $s_f = \max[3 b_f; d_k]$  où  $b_f$  – est la largeur de la barre rectangulaire à engraver Sika CarboDur® S NSM en mm ;  $d_k$  - diamètre du plus gros grain du béton en mm ;
- $s_f = \max[3 \phi_s; d_k]$ , où  $\phi_s$  – est le diamètre de la barre circulaire à engraver Sika CarboDur® BC en mm ;  $d_k$  - diamètre du plus gros grain du béton en mm ;

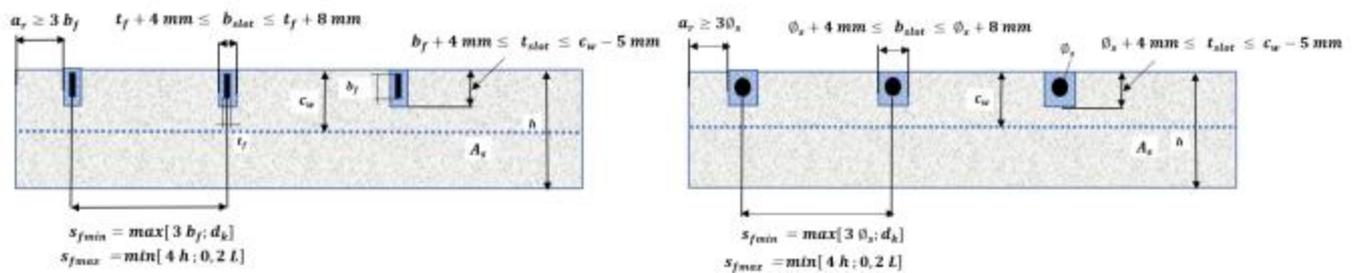
La distance entre l'axe de renfort à engraver et bord libre de l'élément  $a_r$  [mm] :

- $a_r \geq 3 b_f$ , où  $b_f$  – est la largeur de la barre rectangulaire à engraver Sika CarboDur® S NSM en mm ;
- $a_r \geq 3 \phi_s$ ; où  $\phi_s$  – est le diamètre de la barre circulaire à engraver Sika CarboDur® BC en mm.

Les espacements maximaux entre les renforts à la flexion à engraver sont calculés conformément au §9.3.1.1(3) de la norme NF EN 1992-2 en précisant notamment les définitions des hauteurs efficaces et ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes :

- Entraxe maximale  $s_{fmax}$  [mm] =  $\min[4 h ; 0,2 L]$ , où  $h$  - est l'épaisseur de la dalle et où  $L$  - la portée de l'élément à renforcer ;
- Entraxe en porte-à-faux  $s_{fmax}$  [mm] =  $0,4 L$ , où  $L$  - la portée de l'élément à renforcer

Chaque rainure ne doit pas recevoir plus d'une barre insérée dans l'enrobage.



**Dispositions constructives composites Sika® CarboDur® à engraver**

### 2.4.3. Travaux préparatoires

#### 2.4.3.1. Préparation du support pour renforts PRFC collés en surface

La préparation mécanique du support a pour objet :

- d'éliminer toute trace d'huile, de graisse, de laitance, de revêtements ou imprégnations existants, de produit de décoffrage, autres particules et salissures limitant l'adhérence de la colle époxy ;
- de mettre en évidence d'éventuelles zones fissurées et/ou ségréguées, des cavités ou des armatures apparentes corrodées.

Le diagnostic permet de déterminer s'il faut éliminer les parties du support contaminées par la pénétration de chlorures, sulfates. La préparation mécanique du support peut être réalisée par ponçage au disque diamanté, hydro-décapage\*, hydro-sablage\*, sablage, grenailage. Les méthodes qui affaiblissent la peau du béton ou qui peuvent générer de la fissuration de surface ne sont pas adaptées (bouchardage, burinage, décapage thermique, ...).

(\*) dans ce cas, un temps de séchage de la surface décapée doit être observé avant la mise en œuvre des renforts PRFC.

Le but recherché n'est pas de créer une forte rugosité apparente mais plutôt d'éliminer la couche superficielle, ayant généralement une faible cohésion, pour arriver à la structure du béton (granulats apparents du béton).

L'entreprise retient le moyen le plus adapté en fonction de la qualité du support, de la présence d'une peinture ou d'un revêtement et des conditions d'environnement.

Les défauts de surface en saillie et arrêtes de coffrage sont éliminés par ponçage.

#### 2.4.3.2. Cohésion superficielle du support après préparation

Après préparation, la résistance moyenne à la traction du support béton  $f_{ctm}$  doit être systématiquement vérifiée par des essais de pastillage réalisés en se basant sur la norme NF EN 1542, avant la mise en œuvre des renforts. Dans tous les cas, le procédé Sika CarboDur® n'est pas applicable si les essais de pastillage donnent une valeur de  $f_{ctm} < 1,5$  MPa.

La valeur obtenue sert à caractériser le support avant la mise en œuvre des renforts PRFC mais aussi à valider les hypothèses prises lors du dimensionnement des renforts (vérification du glissement à l'interface PRFC/Béton).

**Remarque :** dans tous les cas, le support après préparation et juste avant le début du collage des renforts PRFC doit être soigneusement dépoussiéré.

#### 2.4.3.3. Aspect de surface après décapage

La surface du béton qui reçoit le renfort PRFC doit présenter au minimum les tolérances de planéité d'un parement simple suivant le fascicule N°65 : la planéité globale mesurée avec une règle de 2 m - 5 mm et la planéité locale mesurée avec un réglet de 20 cm - 3 mm. Si les conditions de parement simple ne sont pas respectées des justificatifs sont à fournir.

En fonction de l'aspect de surface obtenu après décapage mécanique, il peut être nécessaire de procéder aux dispositions correctives suivantes :

- Procéder à des bouchages de petits défauts locaux (pores, bullage de surface, forte rugosité ponctuelle du parement) à l'aide du produit Sikadur®-30.
- Procéder à des remplissages de cavités, à des reprofilages / ragréages ponctuels à l'aide du produit Sikadur® -41+ ou Sikadur®-30 ou des produits base ciment de la gamme Sika MonoTop (Sika MonoTop®-410R, ...). Les travaux de réparation sont réalisés conformément aux normes NF P 95-101, NF EN 1504-10 et NF EN 1504-3.

Lorsque le diagnostic et la préparation du support ont mis en évidence des désordres liés à l'oxydation des armatures internes (fissures, épaufrures...), il est nécessaire, préalablement à l'opération de renforcement, de réparer la zone d'enrobage (consulter la norme NF EN 1504-10, et NF P 95-101).

Traiter les fissures inertes de largeur supérieure à 0,3 mm selon la norme NF P 95-103 afin de recréer le monolithisme des éléments de structure et d'éviter toute discontinuité de la surface de collage. Pour les fissures de grandes largeurs (> 2-3 mm), ouvrir les fissures et reboucher à l'aide d'un mortier de la gamme Sika MonoTop ou SikaTop. Pour les fissures de faible largeur, injecter selon les cas par gravité ou sous pression avec le produit Sikadur®-52.

#### 2.4.3.4. Préparation du support pour renforts PRFC à engraver

Avant rainurage du support, la structure de béton armé doit être diagnostiquée pour déterminer la présence et la profondeur des armatures internes existantes, la présence de canalisations, câbles, etc...

Lors de l'opération de rainurage, veiller à ne pas endommager ni couper les armatures internes du béton, les armatures de précontrainte, les gaines engravées, etc. Si le lit supérieur des armatures internes du béton est parallèle au sens des lamelles engravées il peut être envisagé de positionner les lamelles engravées entre les aciers existants.

La largeur et la profondeur des rainures à créer dépendent du type et dimensions de la barre sélectionnée.

A partir des plans du bureau d'études, positionner les emplacements et espacements entre futures rainures et tracer avec un crayon ou un cordeau traceur les rainures à réaliser sur le support (largeur, longueur).

Veiller à la rectitude des rainures qui seront réalisées afin de permettre ultérieurement la mise en œuvre correcte des barres en conservant l'espace libre nécessaire à l'enrobage de la barre par la colle.

La préparation de la rainure se fait à l'aide d'une rainureuse (machine de refendage) avec disque diamant pour le béton sans apport d'eau, couplée à un aspirateur industriel, ou pour les zones plus difficilement accessibles à l'aide d'une disqueteuse diamantée à béton. Assurer la finition de la découpe en fond de rainure par exemple à l'aide d'un burin plat.

Les surfaces préparées doivent être ensuite brossées à l'aide d'une brosse métallique, puis aspirées pour éliminer les poussières et les particules peu et non adhérentes. Cette étape est primordiale notamment pour permettre l'adhérence de la colle au support béton.

En cas d'utilisation des adhésifs : Sikadur®-330, Sikadur®-30, Sikadur®-53, l'humidité interne du béton doit être inférieure à 4%. Il ne doit pas y avoir d'arrivée d'eau dans la rainure lors de la mise en œuvre de la colle.

## 2.4.4. Conditions générales d'application

### 2.4.4.1. Conditions climatiques

Le support doit être à l'abri de la pluie et de toute arrivée d'eau. Il ne doit pas être gelé, ni présenter de film d'eau en surface au moment de la mise en œuvre des produits de collage structural Sikadur®.

#### 2.4.4.1.1. Respect de non-condensation sur le support

Les opérations de mise en œuvre de renforts PRFC ne doivent pas débuter s'il y a un risque de condensation sur le support.

Les contrôles périodiques de non-condensation sont à réaliser préalablement au démarrage du malaxage du produit de collage Sikadur®. La périodicité du contrôle est inhérente aux conditions précises de chaque chantier et du risque plus ou moins élevé de condensation (% Humidité Relative > 80% par exemple). Elle est donc à définir par l'entreprise en coordination avec le maître d'œuvre ou contrôleur.

- Mesures à effectuer : relever simultanément la température ambiante, le taux d'humidité relative et la température du support.
- Objectif à atteindre : il faut vérifier que la température du support est supérieure d'au moins +3°C par rapport à la température du point de rosée.
- Consulter le diagramme de Mollier en annexe ou utiliser des appareils spécifiques qui permettent des prises de mesures simples et rapides et à distance du support afin de savoir instantanément s'il y a ou non risque de condensation.

Solutions en cas de risque de condensation : il faut rechercher les conditions plus favorables permettant de s'éloigner du risque de condensation par exemple en réchauffant le support et l'air ambiant et/ou en abaissant l'humidité de l'air.

#### 2.4.4.1.2. Plage de températures mini et maxi (support et ambiance)

Plage de températures (support et ambiance) recommandée : entre +8°C et +35°C.

En dehors de cette plage de températures, les conditions d'emploi ne sont pas optimales (Durée Pratique d'Utilisation, facilité de malaxage, vitesse de durcissement, facilité de mise en œuvre, ...).

### 2.4.4.2. Conditions de réception du support

Il est nécessaire de vérifier notamment avant le début des opérations de mise en œuvre des renforts que le support est exempt de poussière et toute autre particule limitant l'adhérence des produits de collage. En effet, malgré le soin apporté à la préparation du support, il peut arriver que le moment prévu pour l'application soit décalé par rapport à la période de nettoyage du support (décalage dans le planning par exemple).

## 2.4.5. Méthodologie de mise en œuvre

Avant tout démarrage de la mise en œuvre, l'entreprise applicatrice doit disposer d'un plan de pose des renforts PRFC définissant :

- Le procédé à utiliser : Sika CarboDur® ;
- Le type de renfort : Sika CarboDur® S,M, Sika CarboDur® S NSM, Sika CarboDur® BC;
- La section des renforts : largeur, épaisseur ;
- Le nombre et la longueur des renforts à mettre en œuvre ;
- Le positionnement des renforts sur la structure ;
- L'espacement entre renforts ;
- La distance entre les renforts et les bords des éléments de structure ;

Les produits doivent être stockés dans les conditions requises : en particulier, les produits de collage doivent être conservés à température favorable pour pouvoir effectuer un mélange correct. Les produits à base de fibres de carbone doivent être tenus à l'abri en particulier de la pluie, du soleil, de la poussière.

Répertorier les numéros de lots de fabrication des renforts PRFC utilisés : Sika CarboDur® et résines Sikadur®.

Pour les cas d'application à basse ou haute température, stocker préalablement les produits pendant au moins 24 heures dans un lieu de stockage à température modérée et contrôlée pour faciliter le malaxage, l'application et améliorer les DPU.

Une attention toute particulière doit être portée aux conditions ambiantes et environnementales : vérifier les températures minimale et maximale pour le support, l'ambiance, le produit. Eviter les risques de condensation (température du support > température du point de rosée + 3°C).

## 2.4.6. Préconisations de mise en œuvre des lamelles Sika CarboDur® collées

### 2.4.6.1. Préparation de la lamelle Sika CarboDur®

- Choisir la lamelle définie dans la note de calcul ou sur le plan d'exécution (exemple Sika CarboDur S512). Vérifier la référence et noter le N° de lot imprimé sur la lamelle.
- Découper la lamelle à la longueur définie par le Bureau d'Etudes, à l'aide d'une scie à métaux ou au disque diamant à tronçonner.
- Le nettoyage de la lamelle a pour but d'éliminer poussière et particules grasses. Il se pratique juste avant l'encollage pour éviter tout nouveau dépôt de poussière et matière grasse. Nettoyer et dégraisser la face à encoller (face opposée à celle qui fait l'objet du marquage du numéro de lot) à l'aide d'un chiffon blanc imbibé de produit de nettoyage à base de solvant (par exemple avec le Nettoyant Sikadur ou autre produit de type isopropanol). Il faut laisser le solvant s'évaporer avant l'encollage de la lamelle. Ne pas utiliser d'acétone car il s'évapore trop vite sans laisser le temps suffisant pour nettoyer la lamelle.

### 2.4.6.2. Préparation de la colle Sikadur-30

- Homogénéiser chaque composant séparément dans son emballage.
- Verser la totalité du composant B dans le composant A.
- Mélanger avec un malaxeur muni de l'hélice hélicoïdale spécial Sikadur pendant 3 minutes à vitesse lente (300 tours/minute environ) afin de limiter l'inclusion d'air, jusqu'à obtenir un mélange de consistance homogène et de couleur uniforme gris clair.
- Si nécessaire, transvaser l'ensemble du mélange dans un récipient propre, puis mélanger à nouveau pendant environ 1 minute.
- La durée de vie en pot débute quand les 2 composants sont mélangés. Elle est plus courte à hautes températures et plus longue à basses températures. Plus la quantité mélangée est importante, plus la durée de vie en pot est courte. Pour obtenir une durée de vie en pot plus longue à hautes températures, diviser le produit une fois mélangé en plusieurs parties. Une autre méthode consiste à rafraîchir (pas en dessous de 5 °C) les parties A et B avant de les mélanger.

#### Consommation théorique approximative par mètre de lamelle \*

| Largeur de lamelle | 50 mm   | 80 mm   | 100 mm  | 150 mm  |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| Sikadur-30         | ≈ 200 g | ≈ 350 g | ≈ 400 g | ≈ 600 g |

\* valeurs ne tenant pas compte d'éventuelles pertes, résidus dans les pots et sur les outils. La consommation peut varier suivant la planéité, la rugosité du support et le croisement ou la superposition de lamelles.

### 2.4.6.3. Pose de la lamelle Sika CarboDur®

#### Dispositions générales

- Appliquer la colle Sikadur-30 par double encollage : une couche sur le support béton (1 mm environ) et une couche sur la lamelle Sika CarboDur (1 à 1,5 mm).
- L'encollage de la lamelle se fait généralement sur un plan de travail propre et protégé par un film plastique. L'application de la colle sur la lamelle est réalisée à l'aide d'une spatule ou d'une truelle langue de chat pour les faibles linéaires de lamelle ou à l'aide d'un dispositif d'encollage adapté pour les linéaires plus importants. Nous consulter.
- La lamelle doit être positionnée sur le support préalablement préparé de la structure conformément au calepinage et au dimensionnement réalisé par le Bureau d'études ou le Maître d'œuvre. Veiller notamment à respecter les espaces entre lamelles, les distances aux appuis.

Distance aux bords :

- sur les bords de poutre à renforcer, il faut respecter une distance entre la lamelle et l'arête de la poutre. La lamelle doit être positionnée à une distance équivalente à au moins l'enrobage des armatures internes du béton armé. Cela évite de renforcer une zone non armée sujette à fissuration.
- Positionner et plaquer manuellement la lamelle encollée sur le support en exerçant une légère pression ; ceci doit se faire pendant le temps limite d'assemblage du Sikadur-30, soit 50 minutes environ à 20°C.

- Puis presser à l'aide du rouleau maroufler ; le marouflage soigné doit être réalisé dans le sens longitudinal sur toute la largeur de lamelle jusqu'à obtenir un reflux continu de colle sur les bords de la lamelle.
- Enlever immédiatement ou avant durcissement, l'excédent de colle sur les bords de la lamelle avec une spatule et ne pas réutiliser les résidus s'ils ont été souillés (poussière, ...).

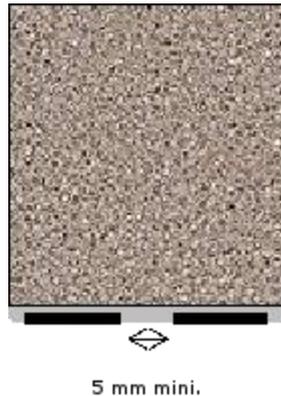
Les éventuels restes de colle sur la lamelle peuvent être éliminés à l'aide d'un chiffon imbibé de produit de nettoyage à base de solvant (par exemple Nettoyant Sikadur ou autre produit dégraissant).

La faible masse de la lamelle Sika CarboDur et la thixotropie du Sikadur-30 permettent d'obtenir le collage de l'ensemble sans maintien d'une pression d'application pendant la mise en œuvre et le durcissement de la colle (pas besoin d'étayage).

Si cela est prévu dans le plan d'autocontrôle, prélever des échantillons de Sikadur-30 afin de contrôler la polymérisation du mélange (mesure de dureté shore D). Cela peut aussi servir d'aide à la décision sur le délai de la remise en service de l'ouvrage.

### Ces de lamelles juxtaposées

Dans le cas de la juxtaposition de deux ou plusieurs lamelles, prévoir un espace libre d'au moins 5 mm entre celles-ci afin de permettre l'évacuation de l'excès de colle ou de bulles d'air lors du marouflage.



**Lamelles juxtaposées**

### Cas de lamelles superposées et / ou croisées

Compte tenu de leur faible épaisseur et de leur souplesse, les lamelles peuvent être superposées par collage sans difficulté.

Le nombre maximal de couches superposées de lamelles n'est pas lié à la lamelle elle-même ou la colle, mais dépend de la qualité et de la capacité en cisaillement du support en béton.

Elles peuvent également être croisées pour réaliser un renforcement bidirectionnel de dalle par exemple.

Avant le collage des lamelles superposées ou croisées, il est nécessaire d'attendre le durcissement de la première couche de lamelle (généralement le lendemain). Sinon des risques de décollements locaux ou de présence de bulles d'air peuvent apparaître.

**Note importante** : pour permettre le collage et le marouflage d'une lamelle en superposition, les éventuelles bavures de colle sur la première lamelle collée doivent absolument être éliminées après marouflage à l'aide d'un chiffon imbibé de produit de nettoyage à base de solvant (par exemple Nettoyant Sikadur ou autre produit dégraissant).

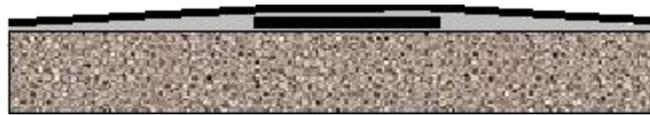
Le collage lamelle sur lamelle s'opère de la même manière que le collage sur béton, en ayant toujours pris soin de dégraisser les faces à coller. Laisser évaporer le solvant du produit de nettoyage.



**Lamelles superposées**

La consommation de colle Sikadur-30 sera réduite par rapport à l'application sur béton (la première lamelle servant de support est lisse, absence de bullage et de rugosité).

Cas des croisements : au droit du croisement, rattraper l'épaisseur de la première lamelle avec du Sikadur-30 appliqué en sifflet.

**Lamelles croisées****Cas de lamelles recouvertes par les tissus de renforcement SikaWrap**

Lorsqu'un même élément de structure doit être renforcé vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant, il convient de procéder dans un premier temps à la mise en œuvre des lamelles (renforcement en flexion) et de venir dans un second temps en recouvrement avec les tissus (renforcement à l'effort tranchant).

Les procédés de renforcement à l'effort tranchant, tissus SikaWrap, font l'objet d'un Avis Technique. Le dimensionnement et la mise en œuvre de ces tissus SikaWrap devront être conforme à l'Avis Technique en cours de validité.

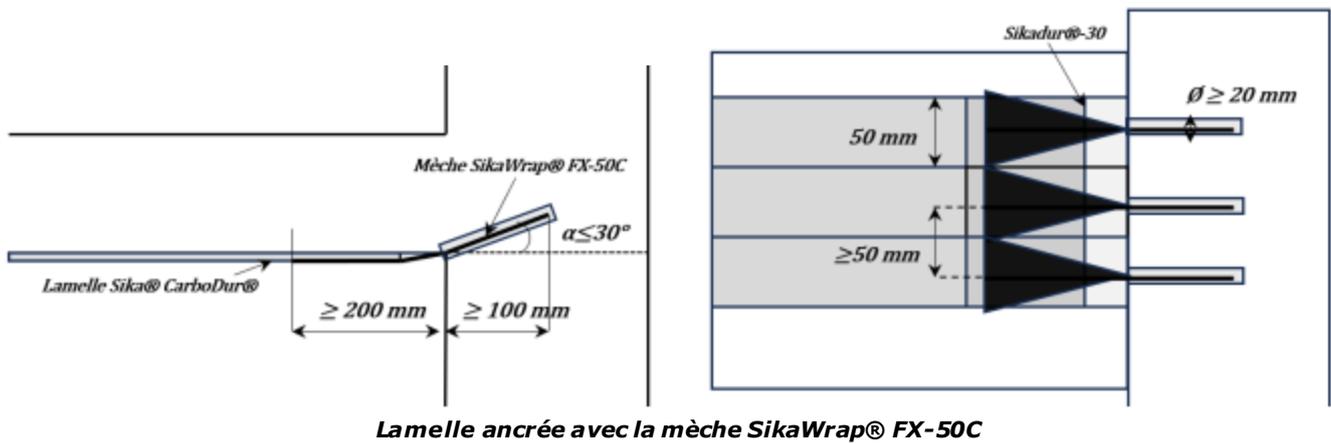
Dans cette optique, la procédure à respecter est la suivante :

- Rattraper l'épaisseur de part et d'autre de la lamelle avec du Sikadur-30 appliqué en sifflet.
- Nettoyage de la lamelle collée en surface avec le Nettoyant Sikadur.
- Le lendemain, mise en œuvre du tissu SikaWrap conformément à l'Avis Technique en cours de validité.

**Lamelles recouvertes par le tissu SikaWrap****Cas de lamelles ancrées avec la mèche SikaWrap® FX-50C**

L'installation des mèches d'ancrage vient après le forage des trous de scellement et le collage des lamelles Sika® CarboDur (délai 24 heures à +20°C à respecter).

- Pour la mise en œuvre de la mèche SikaWrap® FX-50C, un trou de diamètre de 20 mm et de profondeur minimale de 10 cm doit être foré à sec dans la zone comprimée de l'élément avec un angle maximum de 30°. Les angles extérieurs du trou doivent être arrondis à un rayon de 2 cm pour éviter tout dommage causé à la mèche.
- Couper la mèche à la longueur minimale de 300 mm à l'aide de ciseaux spéciaux (longueur totale = longueur à sceller + longueur de fouet de 200 mm minimum).
- Imprégner la mèche avec le Sikadur®- 52 jusqu'à saturation complète, puis éliminer par pressage l'air et la résine en excès.
- Lier et serrer le bout de la mèche imprégnée grâce à un serre-fil en plastique. Couper la partie inutilisée du serre-fil.
- Remplir le trou dans le support en extrudant la cartouche de Sika AnchorFix® - 3030. L'injection de la résine se fait en partant du fond tout en reculant progressivement la buse de mélange, sur les ¾ de la profondeur. Eviter les inclusions d'air.
- Insérer la mèche avec précaution dans le trou à l'aide d'une tige guide raidisseur (ex : rayon de vélo).
- Quand le fond du trou est atteint, retirer avec précaution la tige sans faire ressortir la mèche. Bien veiller à introduire la mèche d'ancrage pendant le temps ouvert de la résine.
- Appliquer Sikadur®-30 sur minimum 200 mm de lamelle en épaisseur de 2 mm.
- Placer la partie extérieure de la mèche sur la lamelle recouverte de Sikadur®-30. Maroufler soigneusement. Le fouet doit être déployé sur la largeur maximale de 50 mm.
- Les lamelles de plus de 50 mm de largeur devront être ancrées par plusieurs mèches sur toute la largeur de renfort à coller.



**Lamelle ancrée avec la mèche SikaWrap® FX-50C**

## 2.4.7. Préconisations de mise en œuvre particulières pour les lamelles Sika CarboDur® à engraver

### 2.4.7.1. Préparation des renforts PRFC

- Les barres Sika CarboDur® BC (section circulaire) sont fournies en 3 m de long en tube carton. Pour des longueurs supérieures à 3 m, nous consulter.
- Les barres Sika CarboDur® S NSM (section rectangulaire) sont fournies en rouleaux de 25, 50, 250 ml.
- Les renforts peuvent être découpés sur chantier à la longueur définie par le calcul du Bureau d'études, à l'aide d'une disqueuse ou d'une scie à métaux.
- Les zones à découper doivent être préalablement enveloppées d'un adhésif afin de minimiser le risque d'éclatement de la barre lors du sciage.
- Avant d'installer les barres, ces dernières doivent être nettoyées avec le Nettoyant Sikadur® afin d'éliminer tous contaminants (graisse, débris, particules, poussières).

### 2.4.7.2. Préparation des résines

- Homogénéiser chaque composant séparément dans son emballage.
- Verser la totalité du composant B dans le composant A.
- Mélanger avec un malaxeur muni de l'hélice hélicoïdale spécial Sikadur pendant 3 minutes à vitesse lente (300 tours/minute environ) afin de limiter l'inclusion d'air, jusqu'à obtenir un mélange de consistance homogène et de couleur uniforme.
- Si nécessaire, transvaser l'ensemble du mélange dans un récipient propre, puis mélanger à nouveau pendant environ 1 minute,
- La durée de vie en pot débute quand les 2 composants sont mélangés. Elle est plus courte à hautes températures et plus longue à basses températures. Plus la quantité mélangée est importante, plus la durée de vie en pot est courte. Pour obtenir une durée de vie en pot plus longue à hautes températures, diviser le produit une fois mélangé en plusieurs parties. Une autre méthode consiste à rafraîchir (pas en dessous de +5°C) les parties A et B avant de les mélanger.
- Sika® AnchorFix®-3030 : consulter la notice Produit pour la préparation et l'application de la résine dans la rainure.

**Consommation usuelle de résine pour 1m de renfort à engraver (variable suivant état du support)- g/mL\***

| Résine                                   | Sika CarboDur® S 1.030 | Sika CarboDur® S 1.525 | Sika CarboDur® S 2.025 | Sika CarboDur® BC 6 | Sika CarboDur® BC 8 | Sika CarboDur® BC 10 | Sika CarboDur® BC 12 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Engravure [ $b_{slot} \times t_{slot}$ ] | 7 x 14                 | 7 x 19                 | 7 x 24                 | 10 x 10             | 12 x 12             | 14 x 14              | 16 x 16              |
| Sikadur®-30                              | 135                    | 189                    | 234                    | 142                 | 186                 | 233                  | 283                  |
| Sikadur®-330                             | 88                     | 124                    | 153                    | 93                  | 122                 | 153                  | 186                  |
| Sikadur®-53                              | 139                    | 195                    | 241                    | 146                 | 191                 | 240                  | 292                  |
| Sika Anchorfix®-3030                     | 102                    | 143                    | 177                    | 108                 | 141                 | 176                  | 214                  |

\* valeurs ne tenant pas compte d'éventuelles pertes, résidus dans les pots et sur les outils.

### 2.4.7.3. Mise en œuvre des renforts à engraver

Avant d'installer les renforts à engraver, toutes les faces de ces derniers doivent être nettoyées à l'aide d'un chiffon blanc imbibé de produit de nettoyage à base de solvant (par exemple avec le Nettoyant Sikadur ou autre produit de type isopropanol).

La mise en œuvre dans la rainure des colles peut être faite par coulage gravitaire ou par extrusion.

La colle fluide Sikadur®-53 est utilisée pour les surfaces horizontales (0 à 2% de pente). La consistance « coulis » permet une mise en œuvre facile et rapide par simple coulage gravitaire dans la rainure. Assurer le remplissage des engravures à refus par gravité ou par extrusion de la colle. Durant la DPU de la colle, les barres sont insérées et maintenues dans les rainures. Il convient de presser légèrement la barre afin de permettre à la colle de refluer de manière continue autour de la barre.

Une autre solution consiste à mettre en place des plots de scellements chimiques (Sika AnchorFix®-3030) au fond de la rainure pour s'assurer de la position correcte de la barre et la stabiliser lors de la mise en œuvre de la colle.

A ce stade, si nécessaire, de la colle peut être appliquée en supplément pour remplir la rainure ou au contraire, le surplus de colle doit être éliminé. Ne pas réutiliser la colle en excès qui peut être souillée ou contaminée.

Pour éliminer les éventuelles bulles d'air et effectuer la finition, la surface doit être lissée à l'aide d'une truelle, lisseuse ou pinceau.

Les colles thixotropes, telles que Sikadur®-330, Sikadur®-30, Sika Anchorfix-3030 sont utilisées pour toutes les surfaces et sous faces, elles sont extrudées via un pistolet, via une poche, truellées, avec un remplissage de préférence depuis le fond de la rainure ou avec un geste empêchant de bloquer des bulles d'air en fond de rainure.

Insérer la lamelle / barre dans la rainure garnie de résine. Le renfort doit être entièrement recouvert de la colle. Finition avec une spatule pour éliminer l'excès de colle.

Le renforcement en sous face, bien que rarement rencontré avec des renforts à engraver Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC, reste possible. La méthode de mise en œuvre est la même que lors des scellements au plafonds réalisés avec un mortier hydraulique ou une résine de scellement chimique avec l'utilisation d'un pistolet plus un dispositif de contention cloué au support pour le maintien, si besoin, de renfort pendant au moins 24 heures à +20°C.

En vue de l'installation de revêtements complémentaires (mortier de chape, ...), la colle en surface du béton doit être saupoudrée de sable à refus. Le sable utilisé doit être sec, propre, calibré.

### 2.4.8. Finition et Protection des renforts Sika CarboDur®

Une fois la mise en œuvre terminée, les renforts PRFC des procédés Sika CarboDur® peuvent être recouverts pour des raisons esthétiques (aspect type béton, finition colorée) ou techniques (protection anti UV, abrasion hydraulique, choc, trafic, ...). Il convient alors de choisir parmi les possibilités décrites ci-dessous. La protection au feu est un cas particulier.

#### 2.4.8.1. Protection anti UV, esthétique, température en service

Les renforts à engraver dans le béton sont noyées dans la résine, il n'est donc pas nécessaire de les protéger vis-à-vis des UV.

Les renforts PRFC collés en surface de béton doivent être à l'abri du rayonnement solaire direct.

La protection anti UV des renforts collés ou esthétique peut être assurée par un des systèmes suivants :

Produits à base de polymères :

Gamme Sikagard (-675 W, -5500, -680 S) ou Sikafloor (-400 N, -264).

Concernant la gamme Sikagard, le coloris est à définir suivant teinte retenue sur un nuancier RAL. Dans le cas d'une exposition directe au rayonnement solaire, il est recommandé de choisir un revêtement de couleur claire.

- Après durcissement du collage de la lamelle, dégraisser la lamelle avec le Nettoyant Sikadur et laisser évaporer le solvant.
- Appliquer le revêtement Sikagard ou Sikafloor, généralement en 2 couches (consulter la Notice Produit).

Produits à base de liant hydraulique :

Gamme de mortiers minces SikaTop, Sika MonoTop, Sikafloor Level de couleur gris béton ou enduits traditionnels, enduits de façades monocouches colorés, enduit plâtre, etc...

- Après durcissement du collage de la lamelle, dégraisser la lamelle avec le Nettoyant Sikadur et laisser évaporer le solvant.
- Appliquer en surface de lamelle une couche de colle Sikadur-30 saupoudrée immédiatement à l'état frais par jet à la volée ou pressage de sable de quartz propre et sec de granulométrie 0,7/1,3 mm par exemple.
- Laisser durcir au minimum 24h et aspirer les restes de sable avant d'appliquer le mortier à base de liant hydraulique.

Température d'exploitation de l'ouvrage en service continu permanent est fixée dans § 2.2.2.3. Au-delà de cette température d'exploitation (cas de certaines zones en industrie notamment) il est nécessaire d'assurer la durabilité du renforcement en protégeant le plan de collage par un mortier base ciment ou par un procédé spécial si la température est élevée.

#### 2.4.8.2. Protection vis-à-vis des chocs, usures, abrasion

Certaines applications des composites Sika CarboDur® peuvent nécessiter une protection complémentaire particulière pour résister et assurer la durabilité du renforcement de l'ouvrage vis-à-vis d'agressions physiques et mécaniques.

Suivant le cas particulier, réaliser une protection à base de mortier hydraulique Sika MonoTop®- 2400R ou -3400, Sika MonoTop®-4012F ou 410 R, ou de revêtement autolissant coloré à base de résine Sikafloor®.

#### 2.4.8.3. Protection au feu des renforts PRFC (Stabilité au feu des structures à renforcer)

Le procédé de renforcement Sika CarboDur® ne présente pas en l'état de résistance particulière au feu.

Lorsque la structure à renforcer est justifiée selon la norme NF EN 1992-1-2 et son Annexe Nationale en prenant en compte uniquement les armatures acier de béton armé existants, aucune disposition de protection au feu est à prévoir.

Dans le cas contraire, il faut prévoir une protection rapportée sur le procédé SikaWrap®. Cette protection (dont la performance et les caractéristiques selon les possibilités de mise en œuvre seront appréciées) sera justifiée, afin que la température selon la durée d'exposition ne dépasse pas la température de transition vitreuse de la colle Sikadur® considérée dans le plan de collage. La protection utilisée devra bénéficier d'un PV de résistance au feu délivré par un laboratoire agréé par le ministère de l'Intérieur sur support identique.

Lorsqu'un flocage doit être appliqué directement sur les renforts Sika CarboDur®, la surface doit être parfaitement dégraissée, puis recevoir une couche de résine Sikadur®, saupoudrée à l'état frais de sable de quartz propre et sec de granulométrie 0,7/1,3 mm.

#### 2.4.8.4. Protection contre la corrosion

Les procédés Sika CarboDur® sont à base de fibres de carbone et de résine époxy : aussi contrairement aux renforts traditionnels en acier, ils sont insensibles à la corrosion. Aucune protection particulière n'est ainsi nécessaire pour assurer la durabilité du renforcement.

### 2.4.9. Contrôle des travaux

Le contrôle interne (autocontrôle) est réalisé par l'équipe qui met en œuvre les procédés Sika CarboDur®. Le plan de contrôle défini par l'entreprise reprend les différents points à contrôler avant, pendant, et après la mise en œuvre. Les annexes de ce document présentent un exemple de fiches d'autocontrôle.

Dès le début des travaux et tout au long du chantier, l'entreprise complète et tient à jour ces fiches d'autocontrôle. Ces fiches reprennent l'ensemble des résultats des contrôles décrits ci-après.

Elles doivent pouvoir être présentées à la demande du contrôleur technique ou du Maître d'œuvre.

Le contrôle externe est réalisé par le maître d'œuvre ou le contrôleur technique du chantier considéré.

#### A- Contrôles avant la mise en œuvre

- Plan de pose des renforts PRFC disponible ;
- Produits disponibles sur site et stockage conforme aux indications des Notices Produit ;
- Test sur la qualité et la cohésion de surface du béton préparé selon le protocole de la norme NF EN 1542 : > 1,5 MPa. Dans le cas contraire, l'entreprise doit informer immédiatement le maître d'œuvre et/ou le contrôleur technique des valeurs obtenues ;
- Vérification de l'état du support préparé : tolérance de planéité et de texture, traitement des éclats de béton avec ou sans armatures apparentes, fissures traitées ou injectées, balèbres meulées ou poncées, absence de poussières ... ;
- Vérifications des conditions favorables de température de l'ambiance et du support, de l'humidité relative, du point de rosée (absence de condensation sur le support pendant les opérations de collage) ;
- Pour les travaux en extérieur : bonnes conditions climatiques sans pluie, gel dégel ;
- Vérification de la disponibilité des EPI (Equipements de Protection Individuelle) pour l'ensemble du personnel et du matériel nécessaire à la mise en œuvre ;
- Relevé des N° de lots des produits qui seront utilisés lors de la mise en œuvre.

#### B- Contrôle lors la mise en œuvre

- Bon état des produits juste avant la réalisation du mélange ;
- Homogénéité du mélange des produits (couleur et consistance) ;
- Suivi de la procédure d'application (voir exemple de fiches d'autocontrôle en annexe) ;
- Vérifier que le collage est continu sur toute la surface des renforts ;
- Détecter la présence éventuelle de vides. Tout défaut décelé peut faire l'objet d'une injection à l'aide du Sikadur® - 52.

- En complément et si cela est prévu dans le cadre du marché :
- Vérification de la résistance des colles durcies Sikadur® par mesurage de la dureté shore D sur échantillons prélevés, à l'aide d'un duromètre (voir §2.2.2.2).

Sur une (des) zone(s) témoin représentative(s) choisie(s) en accord avec le maître d'œuvre prévoir le collage de bandes de PRFC témoin qui feront après durcissement du collage (généralement à échéance 7 jours à 20°C) l'objet d'essai d'adhérence par traction directe selon la norme NF EN 1542. Le nombre de pastilles est à définir avec le maître d'œuvre. Il faut noter que ces essais sont destructifs et ne permettent pas de compter sur le renfort, qui aura été testé, pour la résistance de la structure renforcée.

---

## 2.5. Maintien en service du produit ou procédé

---

Il convient d'assurer la durabilité du système de renforcement, pour la durée d'utilisation du projet, en tenant compte des classes d'exposition, avec des mesures de protection supplémentaires si nécessaire.

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

---

## 2.6. Assistance technique

---

### 2.6.1. Assistance technique lors du dimensionnement

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

Sika met à la disposition des calculateurs un logiciel de dimensionnement Sika CarboDur développé en interne. La responsabilité des résultats et donc de la structure du logiciel revient au Titulaire. Toutefois, le bureau d'étude structure utilisateur du logiciel reste responsable de la bonne utilisation du logiciel suivant le cahier des charges fourni et de la définition des hypothèses et des données d'entrée.

### 2.6.2. Qualification de l'entreprise applicatrice des procédés Sika CarboDur®

Le Maître de l'ouvrage et le Maître d'œuvre doivent faire appel à une entreprise applicatrice qualifiée, expérimentée, assurée pour la réalisation des travaux de renforcement.

De plus, afin de respecter les spécifications de mise en œuvre des procédés décrits dans le présent Dossier Technique, le personnel de l'entreprise doit être formé à l'utilisation des produits (composites PRFC, produits associés et complémentaires) par le service Formation Sika.

A la suite à cette formation, chaque personne formée reçoit un certificat qui atteste qu'elle a suivi le programme de formation spécialisé relatif à l'utilisation et à la mise en œuvre des produits et procédés Sika CarboDur®.

### 2.6.3. Démarrage de chantier

Sur demande de l'entreprise, Sika assure l'assistance technique pour démonstration de la mise en œuvre des produits lors du démarrage du chantier.

---

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

---

Le système de management de la Qualité de Sika France est en conformité avec la norme ISO 9001 : 2008 pour la conception, fabrication et commercialisation de l'ensemble des produits pour la construction et l'industrie.

Les résines Sikadur® font l'objet du marquage CE obligatoire sur les produits de collage de renforts structuraux suivant la norme NF EN 1504-9, sous système d'attestation 2+ (Essais sur produits réalisés en usine, avec inspection et surveillance continue de la production en usine par un tiers externe).

L'Avis Technique du procédé Sika CarboDur ® fait l'objet d'un suivi des contrôles de caractéristiques des différents composants réalisé dans le cadre de procédures internes d'autocontrôle et d'un contrôle externe une fois par an par le CSTB sur la base du référentiel « Document Technique – Renforcement des structures par collage de matériaux composites » du 22/07/2021.

---

## 2.8. Mention des justificatifs

---

- Essai d'adhérence sur béton, par traction directe, par traction cisaillement, avant et après vieillissement accéléré, LCPC.
- Essai de traction uni axiale et de traction cisaillement interlaminaire, avant et après vieillissement accéléré, LGCIE.
- Rapport de Thèse de l'Université d'Artois à Béthune (E. DAVID, septembre 2013).
- Essai de tenue aux UV du composite, SIKA
- LMC2 – Caractérisation des barres Sika CarboDur BC – Traction uniaxiale et pull-out modifié.
- LMC2 – Caractérisation des barres Sika CarboDur S, type NSM – Traction uniaxiale et pull-out modifié.

- LMC2 – Sikadur®-53 : Evaluation de Tg.
- LMC2 - Détermination des caractéristiques mécaniques d'une mèche d'ancrage composite : Essai interlaminaire mèche-lamelle.
- Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP, Ernst- Lucas Klamer, Thèse Technische Universiteit Eindhoven, 2009.
- Sika AnchorFix®-3030, European Technical Assessment ETA 17/0694 of 25/10/2021.
- Rapport d'étude CEREMA, 2023, Comportement en cisaillement des renforts composites collés sur béton aux températures élevées – procédé Sika CarboDur.

### 2.8.1. Références chantiers

| Date mise en œuvre / réception | Lieu                | Description   | Surface / quantité |
|--------------------------------|---------------------|---|--------------------|
| 10/2022 – 02/2023              | Clermont Ferrand    | Usine Michelin (entrepôt de stockage) : Sika CarboDur® S - renforcement en flexion des poutres et des dalles BA                     | 4200 ml            |
| 08/2022 – 11/2022              | Toulouse            | Hôpital Purpan 7 niveaux : Sika CarboDur® S - renforcement poutres, dalles BA en flexion  | 2700 ml            |
| 09/2022 – 10/2022              | Marseille Provence  | Aéroport de Marignan (bâtiment administratif, élargissement) : Sika CarboDur® BC - renforcement chapeaux (moment négatif) dalles BA | 550 ml             |
| 08/2022                        | Cavaillon           | Ville de Cavaillon (bâtiment administratif à 3 étages) : Sika CarboDur® S - renforcement dalles et poutres BA en flexion            | 250 ml             |
| 03/2022 – 06/2022              | Lille               | Lille Métropole Habitat (bâtiment habitation plusieurs étages) : Sika CarboDur® S - renforcement poutres BA en flexion              | 100 ml             |
| 02/2022 – 03/2022              | Paris               | Paris Grand Palais (bâtiment administratif recevant du public) : Sika CarboDur® S - renforcement poutres BA en flexion              | 300 ml             |
| 11/2022                        | Monaco              | Direction de la sûreté publique : Sika CarboDur® S -renforcement en flexion dalles BA, renforcement des trémies                     | 700 ml             |
| 07/2023 – 11/2023              | Bussy Saint Georges | Collège Claude Monnet : Sika CarboDur® S – renforcement en flexion dalles BA, renforcement des trémies                              | 1000 ml            |
| 11/2023 - 2024                 | Saint Brieuc        | Résidence Sadi Carnot : Sika CarboDur® S – renforcement en flexion dalles BA, renforcement des balcons                              | 2500 ml            |
| 11/2023 - 2024                 | Saint Brieuc        | Résidence Sadi Carnot : Sika CarboDur® S NSM – renforcement en flexion dalles BA, renforcement des balcons                          | 1300 ml            |

## 2.9. Annexe du Dossier Technique

### 2.9.1. Annexe 1 – Caractéristiques des composites Sika CarboDur®

#### Caractéristiques des composites Sika CarboDur®

| Valeurs moyennes          |       | Sika CarboDur® S | Sika CarboDur® M | Sika CarboDur® S NSM | Sika CarboDur® BC 6 | Sika CarboDur® BC 8 | Sika CarboDur® BC 10 | Sika CarboDur® BC 12 |
|---------------------------|-------|------------------|------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Module d'élasticité moyen | [GPa] | 170              | 210              | 170                  | 175                 | 153                 | 150                  | 150                  |
| Allongement à rupture     | [%]   | 1,89             | 1,7              | 1,7                  | 1,7                 | 1,6                 | 1,5                  | 1,5                  |
| Résistance en traction    | [MPa] | 3100             | 3200             | 3100                 | 3100                | 2500                | 2300                 | 2300                 |

#### Loi de comportement des composites Sika CarboDur® selon AFGC

##### Sika CarboDur® à coller en surface :

| Propriétés de calcul / Composites                        | Sika CarboDur® S  | Sika CarboDur® M  |
|--|---|---|
| Module d'élasticité, valeur moyenne, $E_f$               | 170 000 MPa   | 210 000 MPa   |
| Résistance moyenne en traction, $f_{fu}$                 | 3100 MPa  | 3200 MPa  |
| Allongement à la rupture valeur moyenne, $\epsilon_{fu}$ | 1,89 %  | 1,7 %   |
| Résistance de calcul ELU, $f_{fud}$                      | 1612 MPa  | 1664 MPa  |
| Allongement de calcul ELU, $\epsilon_{fud}$              | $0,85 \% (\text{Min} \{f_{fud}/E_f ; 0,85 \%\})$              | $0,8 \% (\text{Min} \{f_{fud}/E_f ; 0,85 \%\})$               |
| Résistance de calcul ELS, $f_{fd}$                       | $\text{Min} \{1440 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,\text{lim}}\}^*$ | $\text{Min} \{1490 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,\text{lim}}\}^*$ |

\*Avec  $\sigma_{s,\text{lim}} = 0,8 f_{yk}$ .

##### Sika CarboDur® à engraver :

| Propriétés de calcul / Composites                        | Sika CarboDur® S NSM  | Sika CarboDur® BC 6   | Sika CarboDur® BC 8   | Sika CarboDur® BC 10  | Sika CarboDur® BC 12  |
|--|---|---|---|---|---|
| Module d'élasticité, valeur moyenne, $E_f$               | 170 000 MPa   | 175 000 MPa   | 153 000 MPa   | 150 000 MPa   | 150 000 MPa   |
| Résistance moyenne en traction, $f_{fu}$                 | 3100 MPa  | 3100 MPa  | 2500 MPa  | 2300 MPa  | 2300 MPa  |
| Allongement à la rupture valeur moyenne, $\epsilon_{fu}$ | 1,7 %   | 1,7   | 1,6   | 1,5   | 1,5   |
| Résistance de calcul ELU, $f_{fud}$                      | 1612 MPa  | 1612  | 1300  | 1196  | 1196  |
| Allongement de calcul ELU, $\epsilon_{fud}$              | $0,85 \% (\text{Min} \{f_{fud}/E_f ; 0,85 \%\})$              | $0,85 \% (\text{Min} \{f_{fud}/E_f ; 0,85 \%\})$              | $0,85 \% (\text{Min} \{f_{fud}/E_f ; 0,85 \%\})$              | $0,8 \% (\text{Min} \{f_{fud}/E_f ; 0,85 \%\})$               | $0,8 \% (\text{Min} \{f_{fud}/E_f ; 0,85 \%\})$               |
| Résistance de calcul ELS, $f_{fd}$                       | $\text{Min} \{1440 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,\text{lim}}\}^*$ | $\text{Min} \{1440 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,\text{lim}}\}^*$ | $\text{Min} \{1160 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,\text{lim}}\}^*$ | $\text{Min} \{1068 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,\text{lim}}\}^*$ | $\text{Min} \{1068 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,\text{lim}}\}^*$ |

\*Avec  $\sigma_{s,\text{lim}} = 0,8 f_{yk}$ .

#### Loi de comportement des composites Sika CarboDur® selon TR-55

##### Synthèse des caractéristiques de calcul des composites Sika CarboDur® à coller en surface :

|   |                          | Sika CarboDur® S                                  | Sika CarboDur® M                                  |
|---|--------------------------|---|---|
| Module d'élasticité caractéristique ( <i>fractile 5%</i> )    | $E_{fk}$ , [MPa]         | 165 000   | 205 000   |
| Allongement à rupture caractéristique ( <i>fractile 5%</i> )  | $\varepsilon_{fk}$ , [%] | 1,76  | 1,56  |
| Résistance caractéristique en traction ( <i>fractile 5%</i> ) | $f_{fk}$ , [MPa]         | 2900  | 3200  |
| Module d'élasticité de calcul                                 | $E_{fd,t}$ , [MPa]       | 142 857   | 177 489   |
| Résistance en traction de calcul, $f_{fd}$ [MPa]              | A l'ELU                  | 1913  | 2111  |
|   | A l'ELS                  | $Min \{ 1243 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,lim} \}^*$ | $Min \{ 1372 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,lim} \}^*$ |
| Allongement à rupture de calcul, $\varepsilon_{fd}$ [%]       | A l'ELU                  | $Min \{ \frac{f_{fd,ELU}}{E_{fd}} ; 0,85 \}$      | $Min \{ \frac{f_{fd,ELU}}{E_{fd}} ; 0,85 \}$      |
|   | A l'ELS                  | $\frac{f_{fd,ELS}}{E_{fd}}$                       | $\frac{f_{fd,ELS}}{E_{fd}}$                       |

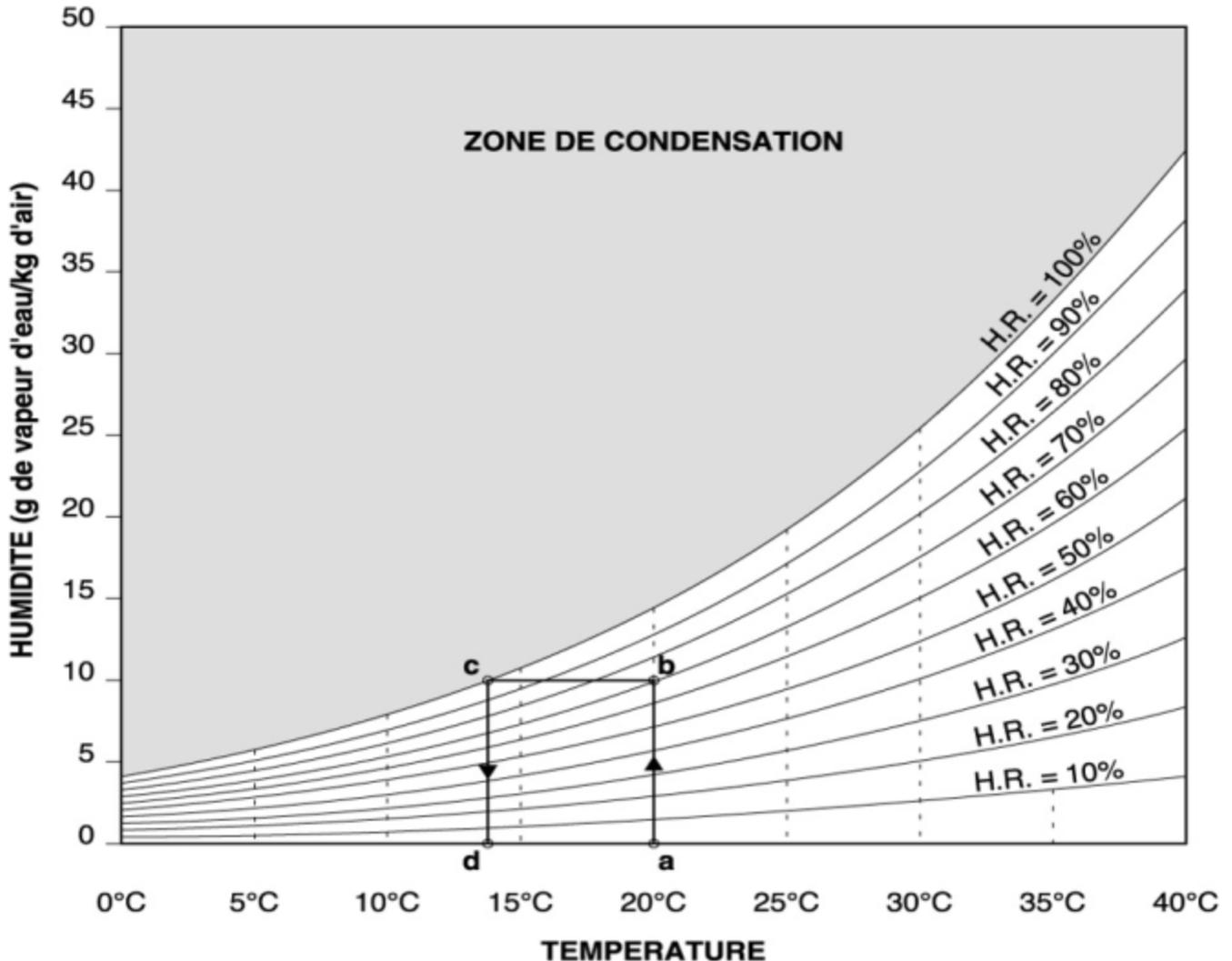
\*Avec  $f_{fd,ELS} = \min(0,90\sigma_{s,lim} ; 0,65 f_{fd,ELU})$ .

**Synthèse des caractéristiques de calcul des composites Sika CarboDur® à graver :**

|   |                          | Sika CarboDur® S NSM                              | Sika CarboDur® BC 6                               | Sika CarboDur® BC 8                              | Sika CarboDur® BC 10                             | Sika CarboDur® BC 12                             |
|---|--------------------------|---|---|--|--|--|
| Module d'élasticité caractéristique ( <i>fractile 5%</i> )    | $E_{fk}$ , [MPa]         | 165 000   | 170 000   | 150 000  | 140 000  | 140 000  |
| Allongement à rupture caractéristique ( <i>fractile 5%</i> )  | $\varepsilon_{fk}$ , [%] | 1,6   | 1,6   | 1,4  | 1,3  | 1,3  |
| Résistance caractéristique en traction ( <i>fractile 5%</i> ) | $f_{fk}$ , [MPa]         | 2900  | 3000  | 2200   | 1900   | 1900   |
| Module d'élasticité de calcul                                 | $E_{fd,t}$ , [MPa]       | 142 900   | 147 200   | 129 900  | 121 200  | 121 200  |
| Résistance en traction de calcul, $f_{fd}$ [MPa]              | A l'ELU                  | 1741  | 1794  | 1385   | 1200   | 1200   |
|   | A l'ELS                  | $Min \{ 1132 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,lim} \}^*$ | $Min \{ 1166 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,lim} \}^*$ | $Min \{ 900 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,lim} \}^*$ | $Min \{ 780 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,lim} \}^*$ | $Min \{ 780 \text{ MPa}; 0,9\sigma_{s,lim} \}^*$ |
| Allongement à rupture de calcul, $\varepsilon_{fd}$ [%]       | A l'ELU                  | $Min \{ \frac{f_{fd,ELU}}{E_{fd}} ; 0,85 \}$      | $Min \{ \frac{f_{fd,ELU}}{E_{fd}} ; 0,85 \}$      | $Min \{ \frac{f_{fd,ELU}}{E_{fd}} ; 0,85 \}$     | $Min \{ \frac{f_{fd,ELU}}{E_{fd}} ; 0,85 \}$     | $Min \{ \frac{f_{fd,ELU}}{E_{fd}} ; 0,85 \}$     |
|   | A l'ELS                  | $\frac{f_{fd,ELS}}{E_{fd}}$                       | $\frac{f_{fd,ELS}}{E_{fd}}$                       | $\frac{f_{fd,ELS}}{E_{fd}}$                      | $\frac{f_{fd,ELS}}{E_{fd}}$                      | $\frac{f_{fd,ELS}}{E_{fd}}$                      |

### 2.9.2. Annexe 2 – Contrôle du risque de condensation sur le support

Pour contrôler le risque de condensation, il est possible d'utiliser soit le diagramme de Mollier ci-dessous soit d'utiliser un thermo hygromètre (mesurage de la température ambiante, de l'humidité relative, de la température du point de rosée) et un thermomètre de surface (mesurage de la température de la surface du support à renforcer). La température du support doit être supérieure à la température du point de rosée augmentée de 3 degrés.



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.

Un exemple est donné pour une température ambiante de 20°C et une humidité relative de 70 % :

Pointer la température ambiante (point a),

Prendre la verticale jusqu'à couper la courbe correspondante 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 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 une température ambiante de 20°C et une humidité relative HR de 70 %, la température du support doit être supérieure à 17°C (soit 14°C + 3°C).

Alternatives du diagramme de Mollier : utiliser des appareils de mesures de type Testo ou similaire :

- Thermomètre laser infrarouge Testo 830 : mesure à distance de la température de surface ;
- Thermo-hygromètre Testo 610 : mesure de l'humidité relative de l'air, de la température ambiante et du point de rosée.

#### **Tableau des points de rosée :**

| Température de l'air (°C) | Températures du point de rosée <sup>1</sup> en °C pour une humidité relative de l'air de |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                           | 45 %   | 50 % | 55 % | 60 % | 65 % | 70 % | 75 % | 80 % | 85 % | 90 % | 95 % |
| 2                         | -8   | -7   | -5   | -4   | -3   | -2   | -2   | -1   | 0    | 0    | 1    |
| 4                         | -6   | -5   | -4   | -3   | -2   | -1   | 0    | 1    | 2    | 2    | 3    |
| 6                         | -4   | -3   | -2   | -1   | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 4    | 5    |
| 8                         | -3   | -2   | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 6    | 7    |
| 10                        | -1   | 0    | 1    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 8    | 9    |
| 12                        | 0  | 2    | 3    | 4    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 10   | 11   |
| 14                        | 2  | 4    | 5    | 6    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 13   |
| 15                        | 3  | 5    | 6    | 7    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 14   |
| 16                        | 4  | 6    | 7    | 8    | 9    | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   |
| 17                        | 5  | 6    | 8    | 9    | 10   | 11   | 13   | 14   | 15   | 15   | 16   |
| 18                        | 6  | 7    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 15   | 15   | 16   | 17   |
| 19                        | 7  | 8    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |
| 20                        | 8  | 9    | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   |
| 21                        | 9  | 10   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |
| 22                        | 10   | 11   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   |
| 23                        | 10   | 12   | 13   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   |
| 24                        | 11   | 13   | 14   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   |
| 25                        | 12   | 14   | 15   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| 26                        | 13   | 15   | 16   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   |
| 27                        | 14   | 16   | 17   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   |
| 28                        | 15   | 17   | 18   | 19   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   |
| 29                        | 16   | 18   | 19   | 20   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   |
| 30                        | 17   | 19   | 20   | 21   | 24   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   |
| 32                        | 19   | 20   | 22   | 23   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   |
| 34                        | 20   | 22   | 24   | 25   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   | 32   | 33   |
| 36                        | 22   | 24   | 26   | 27   | 28   | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   |
| 38                        | 24   | 26   | 28   | 29   | 30   | 32   | 33   | 34   | 35   | 36   | 37   |
| 40                        | 26   | 28   | 29   | 30   | 32   | 33   | 35   | 36   | 37   | 38   | 39   |
| 45                        | 30   | 32   | 34   | 35   | 37   | 38   | 40   | 41   | 42   | 43   | 44   |
| 50                        | 35   | 37   | 38   | 40   | 42   | 43   | 44   | 46   | 47   | 48   | 49   |

Le tableau indique la température du point de rosée (apparition de condensation à la surface du support) en fonction de la température ambiante et de l'humidité relative de l'air.

**Ex :** pour une température ambiante de 10°C et une humidité relative de l'air de 70%, une condensation apparaît sur des surfaces (non absorbantes) pour des températures de surface de 5°C.

1 Les températures du point de rosée sont arrondies au degré supérieur.

## 2.9.3. Annexe 3 – Fiches de contrôle interne à l'entreprise

| <b>Fiche N° 1 - contrôles du support préalables à la mise en œuvre des renforts PRFC collés</b>   |                               |   |
|---|-------------------------------|---|
| Entreprise : ..... Date : .....   |                               |   |
| Référence chantier : .....  |                               |   |
| Type de structure à renforcer (poutre, dalle, poteau) : .....   |                               |   |
| Nature du support : .....   |                               |   |
| Localisation de l'application (référence, plan, étage, ...) : .....   |                               |   |
| .....   |                               |   |
| Nom de la personne chargée du contrôle interne : .....  |                               |   |
| <b>Éléments à contrôler</b>   | <b>conforme<br/>Oui / Non</b> | <b>Actions correctives</b>  |
| Diagnostic de la structure disponible<br>Support contaminé par chlorures, sulfates, autres agents...  |                               | Demande au maître d'œuvre si besoin   |
| Préparation du support<br>Absence de revêtement existant et imprégnation (peinture, revêtements, flocage, plâtre, hydrofuges de surface, ...)   |                               | Élimination des revêtements : décapage par sablage, lavage eau haute pression, ponçage, ...   |
| Absence de laitance, huile, graisse, lichens, mousses,  |                               | Élimination de la laitance et des impuretés : sablage, lavage eau haute pression, ponçage,  |
| Absence de fissure inerte de largeur > 0,3 mm   |                               | Réparation, rebouchage ou injection selon NF P 95103  |
| Absence d'éclats de béton avec ou sans armatures apparentes, de zones ségréguées (nids de cailloux)   |                               | Réparation suivant DTU 42.1, NF P 95101   |
| Absence de défauts de surface : bullage, cavités  |                               | Réparation, surfacage DTU 42.1, NF P 95101  |
| Absence d'arêtes vives  |                               | Arête à abattre ou arrondir par ponçage   |
| Angles de poutre ou de poteau arrondis (Rayon mini = 20 mm)   |                               | Angles à arrondir par ponçage   |
| Planéité de surface :<br>5 mm sous la règle de 2 m  |                               | Ponçage, réparation   |
| Cohésion de support et des éventuelles réparations existantes :<br>Mesurage de la cohésion superficielle du béton par traction directe (essai de pastillage avec appareil sattec) après préparation, selon NF EN 1542 : moyenne des valeurs $\geq 1,5$ MPa<br>Note : le nombre de pastilles, la(les) zone(s) à tester sont à définir avec le maître d'œuvre |                               | Rendre compte au maître d'œuvre/contrôleur technique pour arbitrage :<br>- nouveau mesurage,<br>- décapage puis reconstitution du béton de surface (NF P 95101, DTU 42.1) |
| Plan de pose des renforts disponible avec type de renforts PRFC, nombre de couches, espacement entre renforts, longueur des renforts,   |                               | Obtenir document auprès du bureau d'études d'exécution  |
| Liste du Matériel et EPI disponibles pour tout le personnel   |                               | Obtenir information auprès de l'encadrement de chantier   |
| Conditions de stockage et de conservation des produits conformément aux Notices produits (à l'abri du soleil, de la pluie, température 10 à 20 °C recommandée)  |                               | Mise en stockage conforme   |

**Fiche N° 2 - Contrôles lors de la mise en œuvre des lamelles collées Sika CarboDur®**

Entreprise : ..... Date : .....

Référence chantier : .....

Type de structure à renforcer (poutre, dalle, poteau) : .....

Nature du support : .....

Localisation de l'application (référence, plan, étage, ...) : .....

.....

Nature du renfort utilisé (référence lamelle) : exemple Sika CarboDur® S512  
.....

N° de lot des produits (lamelle, colle Sikadur-30) : .....

Nom de la personne chargée du contrôle interne : .....

| <b>Éléments à contrôler</b>   | <b>conforme<br/>Oui / Non</b>              | <b>Actions correctives</b>  |
|---|--|---|
| Absence de pluie, de gel, de poussière, sur l'élément à renforcer et la zone de travail   |  | Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures de protection de la zone de travail pour être à l'abri.   |
| Vérification des conditions de température :<br>Support / ambiance/ produits<br>Température : +8°C / +35°C<br>(Idéal : ≈ 20°C)  |  | Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures (réchauffement ou refroidissement) pour être à l'abri.<br>Stocker les produits dans un local à température contrôlée                                |
| Contrôle du risque de condensation (voir méthode en annexe 1)<br>Mesurage de la température ambiante, du taux d'humidité relative, de la température de surface du support<br>Temp. de surface du support > Temp. point rosée + 3°C   |  | Voir §2.4.4.1.1 Conditions générales d'application.<br>Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures : réchauffer le support et l'air ambiant et/ou abaisser l'humidité de l'air (déshumidifier). |
| Liste du Matériel et EPI disponibles pour tout le personnel   |  | Obtenir information auprès de l'encadrement de chantier   |
| <b>Préparation de la Lamelle Sika CarboDur</b><br>- référence de la lamelle (exemple CarboDur S512) à appliquer : en accord avec le plan de pose<br>- longueur de lamelle à découper suivant plan de pose<br>- Lamelle en bon état pour le collage : absence de défaut sur la lamelle (cassure, fissure, ...)<br>- Lamelle propre : absence de poussière, de résidu gras, ...   |  | Remplacement de la lamelle, référence conforme au plan ou à la note de calcul<br><br>Dégraisser et nettoyer avec Nettoyant Sikadur  |
| <b>Préparation de la colle Sikadur-30</b><br>Mélange des composants de la colle Sikadur pendant au moins 3 mn jusqu'à obtenir la consistance homogène, la couleur uniforme  |  | Poursuivre le malaxage à vitesse ≤ 300 tr/mn avec l'hélice Sikadur adaptée  |
| <b>Pose de la lamelle</b><br>- Repérage du positionnement : conforme au plan de pose<br>- Encollage lamelle : sur une épaisseur 1 à 1,5 mm<br><br>- Encollage support : 1 mm environ<br><br>- Placage de la lamelle sur le support : exercer une légère pression de la main<br>- Marouflage de la lamelle avec le rouleau Sika : reflux continu de la colle sur les bords de la lamelle<br><br>- Elimination du reflux de colle sur les bords avant durcissement<br>- Nettoyage de la lamelle avec chiffon humidifié avec Nettoyant Sikadur |  | Voir plan de pose   |
|   |  | Régler épaisseur avec une boîte à encoller  |
|   |  | Régler épaisseur avec peigne ou taloche cranté  |
|   |  | Exercer une pression plus importante, rajout de colle si nécessaire   |
|   |  | Marouflage complémentaire, améliorer le double encollage support/lamelle  |
|   |  | Eliminer le reflux de colle   |
|   | Nettoyer la lamelle avec Nettoyant Sikadur |   |

|  |  |  |
|--|--|--|
| Distance entre lamelles : suivant plan de pose   |  | Repérer la position de la lamelle suivante   |
| <b>Contrôle si prévu dans le cadre du marché :</b><br>- vérification de la résistance de la colle durcie Sikadur-30 par mesurage de la dureté shore D sur échantillons prélevés, à l'aide d'un duromètre (après 2 j à 20°C, > 70).<br>- Sur une (des) zone(s) témoin représentative(s) choisie(s) en accord avec le maître d'œuvre prévoir le collage de bandes de PRFC témoin qui feront après durcissement du collage ou du PRFC (généralement à échéance 7 jours à 20°C) l'objet d'essai d'adhérence par traction directe selon la norme NF EN 1542. Le nombre de pastilles est à définir avec le maître d'œuvre. Il faut noter que ces essais sont destructifs et ne permettent pas de compter sur le renfort, qui aura été testé, pour la résistance de la structure renforcée. |  | Vérifications du matériel de mélange, hélice de malaxage Sika, vitesse de malaxage, conditions de température et délai avant mesure des duretés.   |
| <b>Cas de pose de lamelles juxtaposées</b> (la pose bord à bord sans espace libre n'est pas possible)<br>Espace libre mini de 5 mm (généralement 1 cm) entre lamelle<br>- pose de la lamelle juxtaposée : identique à la 1ère lamelle  |  | Respecter un espace libre d'au moins 5 mm entre lamelle pour permettre le reflux de la colle lors du marouflage  |
| <b>Cas de pose de lamelles en superposition</b><br>- pose de la 1ère couche de lamelle : comme indiqué ci-dessus<br>- attendre le durcissement du collage de la 1ère lamelle :<br>- préparation de la 2ème lamelle à superposer : identique à la 1ère lamelle<br>- pose de la 2ème couche de lamelle : identique à la 1ère lamelle   |  | Attendre le durcissement du collage de la 1ère lamelle avant de poser la 2ème lamelle  |
| <b>Cas de pose de lamelles croisées</b><br>- pose de la 1ère couche de lamelle : comme indiqué ci-dessus<br>- au droit du croisement, rattraper l'épaisseur de la 1ère lamelle avec Sikadur-30 appliqué en sifflet<br>- attendre le durcissement du collage de la 1ère lamelle :<br>- préparation de la 2ème lamelle à croiser : identique à la 1ère lamelle<br>- pose de la 2ème lamelle croisée : identique à la 1ère lamelle  |  |  |
| <b>Contrôle après durcissement du collage des lamelles :</b><br>- absence de vides, collage continu sur la surface de la lamelle<br><br>Ou si cela est prévu dans le cadre du marché, contrôle pendant le marouflage de la lamelle par une société spécialisée pour vérifier l'absence de vides par thermographie infrarouge.  |  | Décider avec le maître d'œuvre des actions à mener (aucune action, ou repérage des vides et injection, ou réfection). Arbitrage en fonction de l'importance des vides rencontrés et des risques. |
|  |  |  |

| <b>Fiche N° 3 - Contrôles du support préalables à la mise en œuvre des renforts PRFC engravés</b>  |                               |  |
|--|-------------------------------|--|
| Entreprise : ..... Date : .....  |                               |  |
| Référence chantier : .....   |                               |  |
| Type de structure à renforcer (poutre, dalle) : .....  |                               |  |
| Nature du support : .....  |                               |  |
| Localisation de l'application (référence, plan, étage, ...) : .....  |                               |  |
| .....  |                               |  |
| Nom de la personne chargée du contrôle interne : .....   |                               |  |
| <b>Éléments à contrôler</b>  | <b>conforme<br/>Oui / Non</b> | <b>Actions correctives</b>   |
| Diagnostic de la structure disponible<br>Support contaminé par chlorures, sulfates, autres agents...   |                               | Demande au maître d'œuvre si besoin  |
| Préparation du support<br>Absence de revêtement existant et imprégnation (peinture, revêtements, flocage, plâtre, hydrofuges de surface, ...)  |                               | Élimination des revêtements : décapage par sablage, lavage eau haute pression, ponçage, ...  |
| Absence de laitance, huile, graisse, lichens, mousses,   |                               | Élimination de la laitance et des impuretés : sablage, lavage eau haute pression, ponçage,   |
| Absence de fissure inerte de largeur > 0,3 mm  |                               | Réparation, rebouchage ou injection selon NF P 95103   |
| Absence d'éclats de béton avec ou sans armatures apparentes, de zones ségréguées (nids de cailloux)  |                               | Réparation suivant DTU 42.1, NF P 95101  |
| Absence de défauts de surface : bullage, cavités   |                               | Réparation, surfacage DTU 42.1, NF P 95101   |
| Dimensions des rainures (largeur, profondeur, rectitude sur la longueur) conformes à l'Avis Technique  |                               | Ajuster les dimensions au trait de scie, burin, disqueuse, jusqu'à conformité avec §2.4.2.4 <b>Erreur! Source du renvoi introuvable.</b>           |
| Planéité du fond de rainure :<br>Pourcentage de pente  |                               | Ponçage, réparation<br>Ponçage, réparation   |
| Cohésion de support et des éventuelles réparations existantes :<br>Mesurage de la cohésion superficielle du béton par traction directe (essai de pastillage avec appareil sattec) après préparation, selon NF EN 1542<br>Note : le nombre de pastilles, la(les) zone(s) à tester sont à définir avec le maître d'œuvre |                               | Rendre compte au maître d'œuvre/contrôleur technique pour arbitrage :<br>- décapage puis reconstitution du béton de surface (NF P 95101, DTU 42.1) |
| Plan de pose des renforts disponible avec type de renforts PRFC, espacement entre renforts, longueur des renforts, dimensions des engravures, distances aux bords, etc...  |                               | Obtenir document auprès du bureau d'études d'exécution   |
| Liste du Matériel et EPI disponibles pour tout le personnel  |                               | Obtenir information auprès de l'encadrement de chantier  |
| Conditions de stockage et de conservation des produits conformément aux Notices produits (à l'abri du soleil, de la pluie, température 10 à 20 °C recommandée)   |                               | Mise en stockage conforme  |

**Fiche N° 4 - Contrôles lors de la mise en œuvre des renforts PRFC engravés**

Entreprise : ..... Date : .....

Référence chantier : .....

Type de structure à renforcer (poutre, dalle, poteau) : .....

Nature du support : .....

Localisation de l'application (référence, plan, étage, ...) : .....

.....

Nature du renfort utilisé (référence lamelle) : exemple CarboDur BC 6  
.....

N° de lot des produits (colle Sikadur-53,-330,-30, Sika Anchorfix-3030).....

Nom de la personne chargée du contrôle interne : .....

| Éléments à contrôler  | conforme<br>Oui / Non | Actions correctives   |
|---|-----------------------|---|
| Absence de pluie, de gel, de poussière, sur l'élément à renforcer et la zone de travail   |                       | Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures de protection de la zone de travail pour être à l'abri.   |
| Vérification des conditions de température :<br>Support / ambiance/ produits<br>Température : +8°C / +35°C<br>(idéal : ≈ 20°C)  |                       | Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures (réchauffement ou refroidissement) pour être à l'abri.<br>Stocker les produits dans un local à température contrôlée                                  |
| Contrôle du risque de condensation (voir méthode en annexe 1)<br>Mesurage de la température ambiante, du taux d'humidité relative, de la température de surface du support<br>Temp. de surface du support > Temp. point rosée + 3°C   |                       | Voir §2.4.4.1.1 Conditions générales d'application.<br>• Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures : réchauffer le support et l'air ambiant et/ou abaisser l'humidité de l'air (déshumidifier). |
| Liste du Matériel et EPI disponibles pour tout le personnel   |                       | Obtenir information auprès de l'encadrement de chantier   |
| <b>Préparation de la rainure</b><br>- dimensions des rainures (largeur, profondeur, rectitude sur la longueur), planéité du fond de rainure   |                       | Ponçage, réparation   |
| <b>Préparation des renforts PRFC</b><br>- référence de renfort (exemple Sika CarboDur® BC6) à appliquer : en accord avec le plan de pose<br>- longueur de renfort à découper suivant plan de pose<br>- renfort en bon état pour le collage : absence de défaut sur le renfort (cassure, fissure, ...)<br>- Renfort propre : absence de poussière, de résidu gras, ... |                       | Remplacement de renfort, référence conforme au plan ou à la note de calcul<br><br>Dégraisser et nettoyer avec Nettoyant Sikadur   |
| <b>Préparation des colles</b><br>Mélange des composants de la colle Sikadur pendant au moins 3 mn jusqu'à obtenir la consistance homogène, la couleur uniforme  |                       | Poursuivre le malaxage à vitesse ≤ 300 tr/mn avec l'hélice Sikadur adaptée  |
| <b>Pose de renfort</b><br>- Repérage du positionnement : conforme au plan de pose   |                       | Voir plan de pose   |
| - Mise en place de plots de scellement chimique dans le fond de la rainure  |                       | S'assurer de la planéité du fond de la rainure  |
| - Positionnement de renfort sur les plots de scellement   |                       | Ajuster la position de renfort dans la rainure  |
| - Mise en œuvre de la résine dans la rainure  |                       | Ajouter de la résine jusqu'à ce que le renfort soit noyée et la rainure remplie   |
| - Elimination du reflux de colle sur les bords avant durcissement   |                       | Eliminer le reflux de colle   |

|  |  |  |
|--|--|--|
| Distance entre renforts : suivant plan de pose   |  | Repérer la position de renfort suivant   |
| <u>Contrôle si prévu dans le cadre du marché :</u><br>- vérification de la résistance de la colle durcie par mesurage de la dureté shore D sur échantillons prélevés, à l'aide d'un duromètre. |  | Vérifications du matériel de mélange, hélice de malaxage Sika, vitesse de malaxage, conditions de température et délai avant mesure des duretés. |

## 2.9.4. Annexe 4 – Vérifications particulières des renforts engravés Sika CarboDur® : Exemple de mise en application

### Elément à renforcer :

- Section transversale : dalle
- Hauteur : 200 mm
- Armatures internes supérieures :
  - Enrobage : 30 mm

| $f_{yk}$ (MPa) | $E_s$ (MPa) | Section (mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-------------|----------------------------|
| 500            | 205000      | 628.00                     |

- Béton :
  - Résistance caractéristique en compression du béton :  $f_{ck} = 20$  MPa
  - Résistance caractéristique (fractile 5%) en traction du béton :  $f_{ctk} = 1,55$  MPa

### Coefficients partiels de sécurité selon Eurocode – 2

- Béton
  - $\gamma_c$  (Fondamental) = 1,50
  - $\gamma_c$  (Accidentel) = 1,20
  - $\gamma_c$  (Feu) = 1,00
  - $\alpha_{cc} = 1,00$
- Acier
  - $\gamma_s$  (Fondamental) = 1,15
  - $\gamma_s$  (Accidentel) = 1,00
  - $\gamma_s$  (Feu) = 1,00

### Coefficients de pondération des charges

| Combinaisons Eurocode par défaut | Charges permanentes | Charges d'exploitation |
|----------------------------------|---------------------|------------------------|
| Nouvelles charges du projet      | 1,35                | 1,50                   |

### Charges du projet

- Diagramme de flexion – Négatif
- Mrd0 (élément non renforcé) – 43,76 kNm/m
- Med (nouvelles charges du projet) – 55,85 kNm/m
- Point « A » - 0,23 m.

### Renfort :

|                        | Coefficients partiels de sécurité  | $\varepsilon_{fk}$ | $E_{fk}$ (MPa) | $t_f$ (mm) | $b_f$<br>Largeur (mm) | $A_f$ (mm <sup>2</sup> ) | $b_{barperim}$ , mm | Espacement, mm | $b_{notchperim}$ mm |
|------------------------|--|--------------------|----------------|------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|----------------|---------------------|
| Sika® CarboDur® S1.030 | $\gamma_{FRP,E}: 1.10, \gamma_{FRP,m}: 1.05, \gamma_{FRP,B}: 1.25, \gamma_A: 4.00$ | 0,0176             | 165000,00      | 3,000      | 10,00                 | 30                       | 26                  | 80             | 25                  |

### Résine de scellement :

- Sikadur-330 : résistance caractéristique en traction  $f_{at} = 30 / 1,2 = 25$  MPa ;
- Engravure :
  - La largeur des rainures  $b_{slot} = t_f + 8 = 11$  mm,
  - La profondeur des rainures  $t_{slot} = b_f + 4 = 14$  mm.

### Vérification du décollement des barres induit par les contraintes de cisaillement longitudinales

La contrainte de cisaillement longitudinale est directement proportionnelle au taux de variation de la contrainte axiale dans le renfort. L'augmentation du moment le long de la portée d'une poutre renforcée est partagée par le NSM et l'armature interne du béton, donc le gradient axial le long du NSM (et donc la contrainte de cisaillement longitudinal) peut être faible ou modéré.

La contrainte de cisaillement limite de l'interface adhésif / béton est donnée par :

$$\tau_{lim,c} = \min \left[ 0,8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}; 2 \text{ MPa} \right] = \min \left[ 0,8 \frac{1,55}{1,5}; 2 \text{ MPa} \right] = 0,83 \text{ MPa}$$

Où :

$f_{ctk}$  Résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5%, soit 1,55 ;

$\gamma_c = 1,5$  coefficient partiel relatif au béton.

On doit vérifier que la contrainte de cisaillement à l'interface adhésif / béton est inférieure à la contrainte de cisaillement limite de cette interface :

$$\tau_{conc} \leq \tau_{lim,c}$$

Avec la contrainte de cisaillement à l'interface adhésif / béton défini par l'équation :

$$\tau_{conc} = \frac{A_f}{b_{notchperim}} \left( \frac{\Delta\sigma_f}{\Delta y} \right) = \frac{30}{25} \left( \frac{\Delta\sigma_f}{20} \right) = 0,49 \text{ MPa} < 0,83 \text{ MPa} = > \text{condition vérifiée}$$

Où :

- $A_f$  : section de composite NSM, soit 30 mm<sup>2</sup> ;
- $b_{notchperim}$  : périmètre effectif de rainure, calculé comme étant 1x largeur plus 1x profondeur, soit 25 mm ;
- $\Delta y$  : petite distance entre deux sections consécutives le long de l'élément, prise à 20 mm (la valeur doit être choisie de manière à générer la contrainte de cisaillement maximale) ;
- $\Delta\sigma_f$  : modification de la contrainte dans la barre engravée le long de  $\Delta y$ . La contrainte doit être calculée dans les sections consécutives au moyen de procédures standards (équilibre des forces et compatibilité des déformations entre les différents matériaux), en tenant compte des déformations initiales dans la section au moment de l'installation de NSM.

**La contrainte de cisaillement limite de l'interface barre engravée-adhésif** donnée par :

$$\tau_{ad,lim} = 0,8 \frac{f_{at}}{\gamma_A} = 0,8 \frac{25}{4} = 5 \text{ MPa}$$

Où :

- $f_{at}$  : résistance caractéristique en traction de l'adhésif Sikadur-330, soit 25 MPa ;
- $\gamma_A = 4$  : coefficient partiel de sécurité pour l'adhésif structural.

On doit vérifier que la contrainte de cisaillement à l'interface barre engravée-adhésive est inférieure à la contrainte de cisaillement limite de cette interface :

$$\tau_{ad} \leq \tau_{ad,lim}$$

Avec la contrainte de cisaillement à l'interface barre engravée-adhésif défini par l'équation :

$$\tau_{ad} = \frac{A_f}{b_{barperim}} \left( \frac{\Delta\sigma_f}{\Delta y} \right) = \frac{30}{26} \left( \frac{\Delta\sigma_f}{20} \right) = 0,53 \text{ MPa} < 5 \text{ MPa} = > \text{condition vérifiée}$$

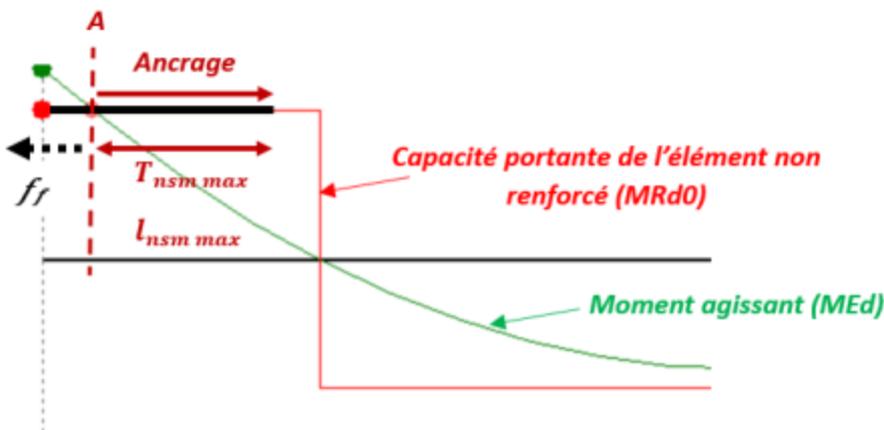
Où :

- $A_f$  : section de composite NSM, soit 30 mm<sup>2</sup> ;
- $b_{barperim}$  : périmètre du composite NSM, soit 26 mm
- $\Delta y$  : petite distance entre deux sections consécutives le long de l'élément prise à 20 mm
- $\Delta\sigma_f$  : modification de contrainte dans le composite engravé le long de  $\Delta y$ .

### Vérification de l'ancrage

Les renforts à engraver Sika® CarboDur® S NSM, BC peuvent être ancrés à partir du point où, selon le calcul, ils ne sont plus nécessaires. Il s'agit de point où le moment agissant ( $M_{Ed}$ ) atteint la capacité portante flexionnelle ( $M_{Rd0}$ ) de la section non renforcée. Le point « A » pour lequel la vérification de l'ancrage est effectuée est déterminé par la condition :  $M_{Ed} = M_{Rd0}$ .

La vérification de l'ancrage est effectuée pour l'état limite ultime en tenant compte des facteurs de sécurité partiels des sollicitations et des matériaux. La force de traction développée par le renfort à engraver  $f_f$  est déterminée par une itération de l'équilibre à partir du moment donné.



### Rupture dans le béton :

- $T_{nsm,max}$  - la force d'ancrage ultime, et  $l_{nsm,max}$  - longueur d'ancrage maximale correspondante définis selon les équations :

$$T_{nsm,max} = 10 b_{notchperim} \sqrt{E_{fd} A_f f_{ctk}} = 10 \times 25 \sqrt{142,9 \times 30 \times 1,55} = \mathbf{20,4 \text{ kN}}$$

$$l_{nsm,max} = 0,135 b_{notchperim} \sqrt{\frac{E_{fd} A_f}{f_{ctk}}} = 0,135 \times 25 \sqrt{\frac{142,9 \times 30}{1,55}} = \mathbf{177,5 \text{ mm}}$$

Où :

- $b_{notchperim}$  : périmètre effectif de rainure, calculé comme étant 1x largeur plus 1x profondeur en mm, soit 25 mm ;
- $E_{fd}$  : module d'élasticité de calcul de composite NSM exprimé en GPa, soit 142,9 GPa ;
- $f_{ctk}$  : Résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5% en MPa, soit 1,55 MPa

#### Rupture dans l'adhésif :

- $T_{nsm,ad}$  - la force d'ancrage assurée par l'adhésif calculée selon l'équation :

$$T_{nsm,ad} = 0,3 f_{at} b_{barperim} l_{nsm} = 0,3 \times 25 \times 26 \times 177,5 = \mathbf{34,6 \text{ kN}}$$

Où :

- $b_{barperim}$  : périmètre du composite NSM, soit 26 mm ;
- $f_{at}$  : résistance caractéristique en traction de l'adhésif structural, soit 25 MPa ;
- $l_{nsm}$  : longueur d'ancrage disponible prise à  $l_{nsm,max}$ , soit 177,5 mm.

#### Rupture dans l'enrobage :

- $T_{nsm,lim}$  - la force limite de rupture dans la zone d'enrobage du béton calculée selon l'équation :

$$T_{nsm,lim} = 38 \sqrt{\frac{b}{n_{nsm}} (E_{fd} A_f f_{ctk})} = T_{nsm,lim} = 38 \sqrt{\frac{1000}{12} \times (142,9 \times 30 \times 1,55)} = \mathbf{28,3 \text{ kN}}$$

- $n_{nsm}$  est le nombre de barres engravées mises en place, soit 12 barres (espacement 80 mm sur 1000 mm)
- $b$  est la largeur de la section à renforcer.

#### Rupture de renfort :

- $T_{ul}$  - l'effort ultime de calcul reprise par composite NSM :

$$T_{ul} = A_f \cdot f_{fd} = 30 \times 1741,5 = \mathbf{52,3 \text{ kN}}$$

Où :

- $f_{fd}$  : résistance de calcul de composite NSM.

Il faut vérifier que la force développée par le renfort à engraver ( $f_f$ ) dans la section où il n'est plus nécessaire ( $M_{Ed} = M_{Rd0}$ ) est plus petite que la force d'ancrage ultime maximale,  $T_{nsm,max}$  et ne dépasse pas de résistances de l'adhésif  $T_{nsm,ad}$  ou de l'enrobage du béton  $T_{nsm,lim}$ , soit

$$f_f = A_f * \sigma_f \leq \min\{T_{nsm,max} \text{ ou } T_{nsm}, \text{ si } l_{nsm} \leq l_{nsm,max}; T_{nsm,ad}; T_{nsm,lim}; T_{ul}\}$$

$$f_f = \frac{30 \times 1098}{12} = \mathbf{2,7 \text{ kN}} \leq \min\{T_{nsm,max} = \mathbf{20,4 \text{ kN}}; T_{nsm,ad} = \mathbf{34,6 \text{ kN}}; T_{nsm,lim} = \mathbf{28,3 \text{ kN}}; T_{ul} = \mathbf{52,3 \text{ kN}}\}$$

Où :

- $\sigma_f$  : contrainte à la traction de renfort engravé à l'ELU dans le point « A », déterminée par une itération de l'équilibre à partir du moment donné, soit 1098 MPa.
- 12 le nombre de renfort par mètre linéaire de dalle.