

Sur le procédé

## SYSTÈME S&P C-Laminate

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

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

### AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

## Versions du document

| Version | Description  | Rapporteur | Président                |
|---------|--|------------|--------------------------|
| V3      | Il s'agit de la révision à l'identique de l'Avis Technique 3.3/19-990_V2 | PAYET Loïc | BERNARDIN-EZRAN Roseline |
| V2      |  | PAYET Loïc | BERNARDIN-EZRAN Roseline |

### Descripteur :

Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller à la surface ou dans les éléments visés des lamelles de carbone à l'aide d'une résine époxydique synthétique à deux composants. Les lamelles gravées sont principalement utilisées pour le renfort en flexion en partie supérieure de dalle ou de poutre, mais d'autres utilisations sont possibles. Ce procédé est destiné à augmenter la capacité portante des éléments concernés, par fonctionnement mécanique conjoint élément-renfort, grâce à l'adhérence conférée par la résine après son durcissement, entre les deux matériaux.

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| $\sigma_{f,ELS} = 1300 \text{ MPa}$ ; | Contrainte de dimensionnement à l'ELS du matériau FRP S&P C-Laminate SM et HM |
| $\sigma_{f,ELU} = 1445 \text{ MPa}$ ; | Contrainte de dimensionnement à l'ELU du matériau FRP S&P C-Laminate SM       |
| $\sigma_{f,ELU} = 1450 \text{ MPa}$ ; | Contrainte de dimensionnement à l'ELU du matériau FRP S&P C-Laminate HM       |

Voir Annexe 1 pour le détail des propriétés mécaniques.

## Table des matières

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.      | Avis du Groupe Spécialisé.....   | 5  |
| 1.1.    | Domaine d'emploi accepté.....  | 5  |
| 1.1.1.  | Zone géographique.....   | 5  |
| 1.1.2.  | Ouvrages visés.....  | 5  |
| 1.2.    | Appréciation.....  | 5  |
| 1.2.1.  | Aptitude à l'emploi du procédé.....  | 5  |
| 1.2.2.  | Durabilité.....  | 6  |
| 1.2.3.  | Aspects sanitaires.....  | 6  |
| 1.2.4.  | Impacts environnementaux.....  | 6  |
| 1.3.    | Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé.....                          | 6  |
| 2.      | Dossier Technique.....   | 8  |
| 2.1.    | Mode de commercialisation.....   | 8  |
| 2.1.1.  | Coordonnées.....   | 8  |
| 2.1.2.  | Identification de composants.....  | 8  |
| 2.2.    | Description.....   | 8  |
| 2.2.1.  | Caractéristiques des composites.....   | 8  |
| 2.2.2.  | Résines.....   | 9  |
| 2.3.    | Produits complémentaires.....  | 11 |
| 2.3.1.  | S&P Resin 230 HP : Mortier de reprofilage des supports.....                  | 11 |
| 2.3.2.  | S&P TECNOGROUT-FIB : Mortier de réparation structurelle.....                 | 11 |
| 2.3.3.  | S&P TECNOGROUT-N : mortier de réparation coulable.....                       | 11 |
| 2.3.4.  | S&P Tecnoimper-Flex : Revêtement souple d'imperméabilisation.....            | 11 |
| 2.3.5.  | S&P Tecnopint : Peinture anti-carbonatation pour la protection du béton..... | 12 |
| 2.4.    | Dispositions de conception.....  | 12 |
| 2.4.1.  | Notations utilisées.....   | 12 |
| 2.4.2.  | Diagnostic préalable.....  | 13 |
| 2.4.3.  | Loi de comportement des matériaux.....                                       | 13 |
| 2.4.4.  | Justification à la rupture.....  | 14 |
| 2.4.5.  | Longueur et forces d'ancrage.....  | 14 |
| 2.5.    | Dimensionnement selon l'Eurocodes 2.....                                     | 15 |
| 2.5.1.  | Hypothèses de calcul.....  | 15 |
| 2.5.2.  | Renforcement en flexion du béton armé.....                                   | 15 |
| 2.5.3.  | Renforcement en flexion du béton précontraint.....                           | 17 |
| 2.6.    | Dimensionnement selon le BAEL et le BPEL 91 révisés 99.....                  | 17 |
| 2.6.1.  | Hypothèses de calcul.....  | 17 |
| 2.6.2.  | Notations complémentaires utilisées dans cette section.....                  | 18 |
| 2.6.3.  | Renforcement en flexion du béton armé.....                                   | 18 |
| 2.6.4.  | Renforcement en flexion du béton précontraint.....                           | 19 |
| 2.7.    | Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP.....                               | 20 |
| 2.7.1.  | Systèmes FRP collés en surface.....  | 20 |
| 2.8.    | Vérification de la contrainte d'entraînement.....                            | 21 |
| 2.9.    | Règles constructives.....  | 21 |
| 2.10.   | Dispositions de mise en œuvre.....   | 22 |
| 2.10.1. | Préparation et contrôles.....  | 22 |
| 2.10.2. | Mise en œuvre des lamelles S&P C-Laminate collées en surface.....            | 23 |
| 2.10.3. | Mise en œuvre des lamelles S&P C-Laminate engravées.....                     | 23 |
| 2.10.4. | Contrôles qualité après la pose des S&P C-Laminate.....                      | 24 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.10.5. | Revêtement des éléments de renfort.....                            | 24 |
| 2.10.6. | Sécurité du travail.....   | 25 |
| 2.11.   | Assistante technique .....   | 25 |
| 2.12.   | Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication ..... | 25 |
| 2.13.   | Résultats expérimentaux.....                                       | 25 |
| 2.14.   | Références chantiers.....  | 25 |
| 2.15.   | Annexes du Dossier Technique .....                                 | 27 |
| 2.15.1. | Annexe 1 : Caractéristiques mécaniques du composite .....          | 28 |
| 2.15.2. | Annexe 2 : Essais d'adhérence suivant NF EN 1542.....              | 29 |
| 2.15.3. | Annexe 3 : Fiche d'autocontrôle type.....                          | 30 |
| 2.15.4. | Annexe 4 : Tableau des points de rosée .....                       | 31 |

# 1. Avis du Groupe Spécialisé

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

---

## 1.1. Domaine d'emploi accepté

---

### 1.1.1. Zone géographique

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

### 1.1.2. Ouvrages visés

L'Avis n'est valable que si la température de la résine, et celle du support au niveau du collage, n'excèdent pas les températures en service continu (supérieure à 24h) et en pointe (pendant 24h) indiquées dans le Dossier Technique établi par le demandeur. Le domaine d'emploi accepté par le Groupe Spécialisé n°3.3 est celui couvrant les éléments en béton armé entrant dans la constitution des bâtiments courants (habitations, bureaux, etc.) et des bâtiments industriels (supermarchés, entrepôts, etc.) Les éléments renforcés par le procédé sont :

- En béton armé ;
- En béton précontraint.

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

Le renforcement par rapport à la torsion ou à la traction pure n'est pas visé.

L'utilisation en bâtiments industriels est admise tant que l'agressivité chimique ambiante peut être considérée comme normale et que les charges non statiques ne sont pas de nature répétitive entretenue pouvant donner lieu à de la fatigue.

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

Le renforcement structural des radiers est visé.

Le procédé SYSTEME S&P C-Laminate n'est utilisé que pour le renforcement en flexion.

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), sortent du champ du présent Avis.

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

- 47°C en pointe (durée ≤ 24h) et 37°C en continu (durée > 24h) pour S&P Resin 220 et S&P Resin 230 ;
- 52°C en pointe (durée ≤ 24h) et 40°C en continu (durée > 24h) pour les S&P Resin 220 HP et S&P Resin 230 HP ;
- 44 °C en pointe (durée ≤ 24h) et 34°C en continu (durée > 24h) pour les S&P Resin 55 ;
- 48°C en pointe (durée ≤ 24h) et 37°C en continu (durée > 24h) pour les S&P Resin 55 HP.

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

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

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

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

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

---

## 1.2. Appréciation

---

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

Satisfaction aux lois et règlements en vigueur et autres qualités d'aptitude à l'emploi

#### 1.2.1.1. Stabilité

L'examen des performances de durabilité du complexe lamelle-résine, au travers des essais de fluage effectués par le demandeur, permet de conclure que le procédé conduit à l'augmentation des capacités résistantes des éléments renforcés,

conformément aux modèles de calcul développés dans le Dossier Technique établi par le demandeur, à condition de respecter strictement le domaine d'emploi donné au 1.1 du présent Avis.

### 1.2.1.2. Sécurité en cas d'incendie

#### 1.2.1.2.1. Réaction au feu

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

#### 1.2.1.2.2. Résistance au feu

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

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

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

### 1.2.2. Durabilité

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

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

En effet, pour le premier cas, la stabilité des caractéristiques mécaniques de la colle n'est pas démontrée. Pour la seconde restriction, la température de transition vitreuse de la résine ne permet pas de dépasser une température en pointe indiquée au paragraphe 2.2.2.3 du présent Avis. Dans le cas où des dégradations (chocs, abrasion, etc.) sont possibles, une protection mécanique du renforcement est à prévoir. Dans le cas d'une utilisation du procédé de renforcement en face supérieure des dalles, le système de renforcement doit être protégé par un mortier. Ceci ne concerne pas le S&P C-Laminate avec lamelles engravées qui sont protégées de par leur mise en œuvre.

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

### 1.2.3. Aspects sanitaires

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

### 1.2.4. Impacts environnementaux

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

---

## 1.3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

---

Le Groupe Spécialisé n°3 a fixé une limite de température en service continu de 34°C pour S&P Resin 55, 37° pour S&P Resin 55 HP (associées aux lamelles engravées), 37° S&P Resin 220 et 40° pour S&P Resin 220 HP (associées aux lamelles colées et aux lamelles engravées). Ces valeurs ont été définies en fonction de la température de transition vitreuse des résines.

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

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

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

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

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

## 2. Dossier Technique

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

---

### 2.1. Mode de commercialisation

---

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

#### 2.1.1. Coordonnées

Simpson Strong-Tie  
 ZAC des 4 Chemins  
 85400 Sainte-Gemme-la-Plaine  
 France  
 Tél. : 02 51 28 44 00  
 Email : [info@sp-reinforcement.fr](mailto:info@sp-reinforcement.fr)  
 Site Internet : [www.sp-reinforcement.fr](http://www.sp-reinforcement.fr)

#### 2.1.2. Identification de composants

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

- Lamelles carbone S&P C-Laminate SM et S&P C-Laminate HM: présentation en couronnes ou en barres droites. Les lamelles sont identifiées par leur dénomination et un numéro de lot, imprimés à intervalles réguliers sur la lamelle. Ces lamelles sont livrées prédécoupées en usine sur mesure ou en couronnes de 100 et 150 mètres en fonction de la largeur.
- S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP, colles pour S&P C-Laminate collées en surface ou engravées ou le reprofilage de faible épaisseur : Colles époxydiques bi-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en kits de 5kg, 15kg ou autres conditionnements sur demande.
- S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP, colles pour S&P C-Laminate engravée : Colles époxydiques bi-composants livrées en kits. La dénomination de la colle est indiquée sur l'emballage du kit. La livraison se fait en pots métalliques de 6 kg, 13 kg ou autres conditionnements sur demande.
- S&P RESIN 230 ou S&P Resin 230 HP : Mortier époxy tri-composants utilisé pour reprofiler le support avant application des lamelles S&P C-Laminate.

---

### 2.2. Description

---

Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller à la surface ou dans les éléments visés des lamelles de carbone pultrudées en usine, à l'aide d'une résine époxydique synthétique à deux composants. Les lamelles engravées sont principalement utilisées pour le renfort en flexion en partie supérieure de dalle ou de poutre, mais d'autres utilisations sont possibles. Ce procédé est destiné à augmenter la capacité portante des éléments concernés, par fonctionnement mécanique conjoint élément-renfort, grâce à l'adhérence conférée par la résine après son durcissement.

Le logiciel d'aide au calcul FRP Lamella fait partie intégrante du système S&P C-Laminate, et est un des outils performants pour les bureaux d'études chargés du dimensionnement.

#### 2.2.1. Caractéristiques des composites

##### **Lamelles S&P C-Laminate**

Les lamelles pultrudées S&P C-Laminate sont disponibles en deux modules d'élasticité type SM (Standard Modulus) et type HM (High Modulus). Le choix sera défini en fonction des résultats des calculs. La qualité SM est la plus couramment utilisée.

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

- Couleur : noir ;
- Taux de fibre : min. 68% ;
- Transition vitreuse de la matrice >100°C.

##### **Caractéristiques mécanique des lamelles**



| Types de lamelles | Modules élastique<br>valeur moyenne<br>(GPa) | Module élastique<br>caractéristique<br>(GPa) | Contrainte de<br>traction à la rupture<br>Valeur moyenne<br>(MPa) | Contrainte<br>caractéristique de<br>traction à la rupture<br>(MPa) | Allongement à la<br>rupture (‰) |
|-------------------|--|--|---|--|---------------------------------|
| S&P C-Laminate SM | ≥170   | ≥168   | ≥2800   | ≥2700  | ≥16                             |
| S&P C-Laminate HM | ≥205   | ≥201   | ≥2800   | ≥2700  | ≥13.5                           |

- Seules les valeurs moyennes sont à prendre en compte dans les calculs.

### **Dimensions et propriétés des lamelles collées**

| Type de lamelles             | Largeur | Épaisseur | Section            |
|------------------------------|---------|-----------|--------------------|
| <b>S&amp;P C-Laminate SM</b> | [mm]    | [mm]      | [mm <sup>2</sup> ] |
| 50 / 1.2                     | 50      | 1,2       | 60                 |
| 50 / 1.4                     | 50      | 1,4       | 70                 |
| 60 / 1.4                     | 60      | 1,4       | 84                 |
| 80 / 1.2                     | 80      | 1,2       | 96                 |
| 80 / 1.4                     | 80      | 1,4       | 112                |
| 90 / 1.4                     | 90      | 1,4       | 126                |
| 100 / 1.2                    | 100     | 1,2       | 120                |
| 100 / 1.4                    | 100     | 1,4       | 140                |
| 120 / 1.2                    | 120     | 1,2       | 144                |
| 120 / 1.4                    | 120     | 1,4       | 168                |
| 150 / 1.2                    | 150     | 1,2       | 180                |
| 150 / 1.4                    | 150     | 1,4       | 210                |
| <b>S&amp;P C-Laminate HM</b> |         |           |                    |
| 50 / 1.4                     | 50      | 1,4       | 70                 |
| 60 / 1.4                     | 60      | 1,4       | 84                 |
| 80 / 1.4                     | 80      | 1,4       | 112                |
| 90 / 1.4                     | 90      | 1,4       | 126                |
| 100 / 1.4                    | 100     | 1,4       | 140                |
| 120 / 1.4                    | 120     | 1,4       | 168                |

### **Dimensions et propriétés Lamelles engravées**

| Types de lamelles            | Largeur | Épaisseur | Section            |
|------------------------------|---------|-----------|--------------------|
| <b>S&amp;P C-Laminate SM</b> | [mm]    | [mm]      | [mm <sup>2</sup> ] |
| 10 / 1.4                     | 10      | 1,4       | 14                 |
| 20 / 1.4                     | 20      | 1,4       | 28                 |
| 10 / 2.8                     | 10      | 2,8       | 28                 |
| <b>S&amp;P C-Laminate HM</b> | [mm]    | [mm]      | [mm <sup>2</sup> ] |
| 10 / 1.4                     | 10      | 1,4       | 14                 |
| 20 / 1.4                     | 20      | 1,4       | 28                 |

S&P produisant ses lamelles dans sa propre usine elles peuvent être obtenues, sur commande, dans d'autres sections avec les mêmes caractéristiques.

## **2.2.2. Résines**

### **2.2.2.1. S&P Resin 220 et S&P Resin 220 HP - Colle pour lamelles S&P C-Laminate**

Colles époxy bi-composant pour le collage des lamelles S&P C-Laminate sur le support ou engravées dans des supports horizontaux et verticaux (NF EN 1504-4). Peut également être utilisé pour des reprofilages jusqu'à 5 mm d'épaisseur.

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

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

#### 2.2.2.2. S&P Resin 55 et S&P Resin 55 HP - Colles pour lamelles engravées

Colles époxy bi-composant pour l'application des lamelles S&P C-Laminate engravées sur un support horizontal.

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

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

#### 2.2.2.3. Température d'utilisation

|                                    | S&P Resin 220 | S&P Resin 220 HP | S&P Resin 55 | S&P Resin 55 HP |
|------------------------------------|---------------|------------------|--------------|-----------------|
| Température de transition vitreuse | 53°C          | 58°C             | 49°C         | 53°C            |
| En service continu (durées > 24h)  | 37°C          | 40°C             | 34°C         | 37°C            |
| En pointe (durées ≤ 24h)           | 47°C          | 52°C             | 44°C         | 48°C            |

#### 2.2.2.4. Consommations

##### S&P C-Laminate collées

Consommation avec lamelles collées, selon la rugosité du support de béton (valeurs usuelles pour une épaisseur de 3mm).

| Largeur de lamelle | Consommation de S&P Resin 220 | Consommation de S&P Resin 220 HP |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 50 mm              | ~ 350 g/ml                    | ~ 350 g/ml                       |
| 60 mm              | ~ 450 g/ml                    | ~ 450 g/ml                       |
| 80 mm              | ~ 550 g/ml                    | ~ 550 g/ml                       |
| 90 mm              | ~ 650 g/ml                    | ~ 650 g/ml                       |
| 100 mm             | ~ 700 g/ml                    | ~ 700 g/ml                       |
| 120 mm             | ~ 850 g/ml                    | ~ 850 g/ml                       |
| 150 mm             | ~ 1050 g/ml                   | ~ 1050 g/ml                      |

##### S&P C-Laminate engravées

Consommation avec lamelles engravées (valeurs usuelles).

| Largeur de lamelle     | Consommation de S&P RESIN 220 | Consommation de S&P RESIN 55 |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 10/1.4 mm<br>10/2.8 mm | ~ 120 g/ml                    | ~ 80 g/ml                    |
| 15/2.5 mm              | ~160 g/ml                     | ~ 110 g/ml                   |
| 20/1.4 mm              | ~200 g/ml                     | ~ 130 g/ml                   |

## 2.3. Produits complémentaires

### 2.3.1. S&P Resin 230 HP : Mortier de reprofilage des supports

Mortier époxy bi-composant utilisé pour aplanir le support (si nécessaire) avant application des lamelles S&P C-Laminate (marquage CE suivant la norme EN 1504).

- Densité : env. 2,05 kg/l

- Epaisseur d'application : jusqu'à 50 mm
- Résistance à la traction sur béton : > 3,0 N/mm<sup>2</sup> (rupture dans le béton)

\* à 20° C et 65 % d'humidité relative

| Produit                           | D.P.U.    |           | Humidité<br>du support | Application                       |
|-----------------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------------------------------|
|                                   | 21° C     | 35° C     |                        |                                   |
| Mortier epoxy S&P<br>Resin 230 HP | ~ 90 min. | ~ 60 min. | < 4 %                  | Températures<br>> 8 °C et < 35 °C |

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

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

- Densité : env. 1,8 g/cm<sup>3</sup>
- Epaisseur d'application : de 5 à 30 mm par couche
- Résistance à la traction sur béton : ≥ 3,0 N/mm<sup>2</sup>
- Résistance à la compression : ≥ 25 N/mm<sup>2</sup> à 1 jour

\* à 20° C et 65 % d'humidité relative

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

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

- Densité : env. 1,9 g/cm<sup>3</sup>
- Epaisseur d'application : de 30 à 80 mm par couche
- Résistance à la traction sur béton : ≥ 2,5 N/mm<sup>2</sup>
- Résistance à la compression : ≥ 30 N/mm<sup>2</sup> à 1 jour

\* à 20° C et 65 % d'humidité relative

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

Revêtement sous forme de mortier élastique à deux composants. Il est destiné à la protection et l'imperméabilisation des structures en béton.

- Densité : env. 1,4 g/cm<sup>3</sup>
- Perméabilité à l'eau liquide :  $w < 0.05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$  (selon EN1062-3)
- Perméabilité au CO<sub>2</sub> :  $S_0 > 50\text{m}$  (selon EN 1062-6)
- Perméabilité à la vapeur d'eau : Classe I (selon EN ISO 7783)
- Résistance à la fissuration : Classe A4 (selon 1062-7)

### 2.3.5. S&P Tecnopint : Peinture anti-carbonatation pour la protection du béton

Peinture à base de résines acryliques en dispersion aqueuse, mono composante, élastique et imperméable, pour la protection des structures en béton.

- Densité : env. 1,55 g/cm<sup>3</sup>
- Perméabilité à l'eau liquide:  $w < 0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$  (selon EN1062-3)
- Perméabilité au CO<sub>2</sub> :  $S_0 > 70 \text{ m}$  (selon EN 1062-6)
- Perméabilité à la vapeur d'eau : Classe I (selon EN ISO 7783)
- Résistance à la fissuration : Classe A3 (selon 1062-7)

---

## 2.4. Dispositions de conception

---

Le présent avis technique est réalisé conformément aux Eurocodes et aux règles AFGC 2011 car ce sont les normes actuelles. Toutefois nous offrons la possibilité de dimensionner selon les BAEL et BPEL 91 révisés 99 en se conformant à la section 2.6 du présent Avis Technique.

### 2.4.1. Notations utilisées

#### Géométrie :

$b_0$  : largeur de la section

$h$  : hauteur de la section

$d$  : hauteur utile

$A_s(A_{sr})$  : section d'acier tendus (comprimés)

$A_f$  : section de fibres utilisées

$b_f$  : largeur du composite

$L_f$  : longueur du composite

$t_f$  : épaisseur du composite

$A_t$  : section des armatures transversales

$S_t$  : espacement des armatures transversales

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

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

#### Notations Matériaux FRP

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

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

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

$\varepsilon_{fk}$  : Allongement caractéristique à la rupture du matériau FRP (fractile 5%)

$f_{fu}$  : Résistance moyenne à la rupture en traction du matériau FRP

$f_{fk}$  : Résistance caractéristique à la rupture en traction du matériau FRP (fractile 5%)

$n_f$  : Nombre de couches superposées de FRP

$m_f$  : Nombre de bandes juxtaposées de FRP

$s_f$  : Entraxe des bandes de FRP

$A_f$  : Section de l'armature FRP  $t_f$  Épaisseur de l'armature FRP

$b_f$  : Largeur de l'armature FRP

$a_r$  : Distance entre axe des lamelles et bord libre de l'élément

$t_s$  : Profondeur de la rainure dans le béton  $b_s$  Largeur de la rainure dans le béton

$b_s$  : Largeur de la rainure dans le béton

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

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

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

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

$R_{fd,ELS}$  : Résistance de dimensionnement à l'ELS du matériau FRP

$R_{fd,ELU}$  : Résistance de dimensionnement à l'ELU du matériau FRP

#### Renfort à la flexion

$M_{EK0}$  : Moment caractéristique lors du renfort

$N_p$  : Force de précontrainte caractéristique

$M_{p0}$  : Part isostatique du moment de précontrainte caractéristique

- $M_{pr}$  : Part du moment de précontrainte dû à l'hyperstaticité de l'élément
- $M_{Edf}$  : Moment de dimensionnement de l'état renforcé
- $M_{Ekf}$  : Moment caractéristique de l'état renforcé
- $M_{Rdf}$  : Moment de dimensionnement admissible de la section renforcée
- $M_{Ed0}$  : Moment de dimensionnement admissible de la section non renforcée
- $M_{Re0}$  : Moment admissible de la section non renforcée (combinaison accidentelle)
- $\eta_M$  : Degré de renforcement à la flexion
- $\gamma_{Me}$  : Sécurité globale restante lors de la défaillance du renfort FRP

**Ancrage**

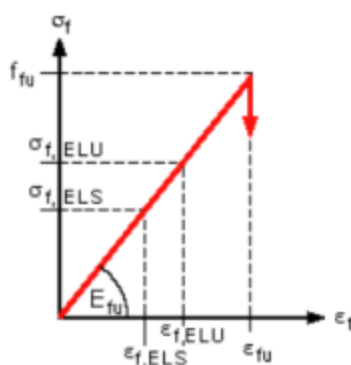
- $f_{csm}$  : Résistance à la traction superficielle du béton (moyenne)
- $f_{ck,cube}$  : Résistance à la compression du béton sur cube (valeur caractéristique)
- $\gamma_c$  : Coefficient de sécurité du béton
- $F_{fd,E}$  : Force de traction du renfort FRP au point E
- $l_b$  : Longueur d'ancrage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

**2.4.2. Diagnostic préalable**

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

**2.4.3. Loi de comportement des matériaux**

2.4.3.1. Composites



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

Les valeurs moyennes et de dimensionnement sont données ci-dessous :

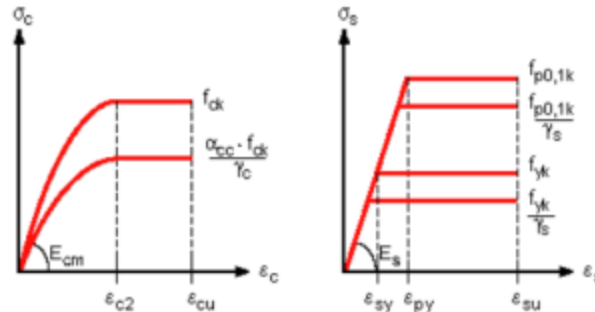
| Désignation                            | Symbole            | Unité | S&P C-Laminate SM | S&P C-Laminate HM |
|--|--------------------|-------|-------------------|-------------------|
| Module d'élasticité (valeur moyenne)   | $E_{fu}$           | MPa   | ≥ 170 000         | ≥ 205 000         |
| Module d'élasticité (valeur de calcul) | $E_{fd}$           | MPa   | 170 000           | 205 000           |
| Contrainte de rupture (valeur moyenne) | $f_{fu}$           | MPa   | ≥ 2 800           | ≥ 2 800           |
| Contrainte de dimensionnement à l'ELU  | $f_{f,ELU}$        | MPa   | 1 445             | 1450              |
| Contrainte de dimensionnement à l'ELS  | $f_{f,ELS}$        | MPa   | 1 300             | 1300              |
| Allongement de dimensionnement à l'ELU | $\epsilon_{f,ELU}$ | ‰     | 8,5               | 7,07              |
| Allongement de dimensionnement à l'ELS | $\epsilon_{f,ELS}$ | ‰     | 7,64              | 6,34              |

Exemple d'estimation de la résistance pour une lamelle type C-Laminate SM, dimension 100/1.2 mm :

- à l'ELS :  $R_{f,ELS} = 1300 \text{ MPa} \times 100\text{mm} \times 1.2\text{mm} = 156 \text{ kN}$
- à l'ELU :  $R_{fd,ELU} = 1445 \text{ MPa} \times 100\text{mm} \times 1.2\text{mm} = 173.4 \text{ kN}$

### 2.4.3.2. Béton et armatures existantes

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



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

### 2.4.4. Justification à la rupture

Cette justification est à effectuer dans tous les cas hors situation d'incendie. Elle doit être réalisée en prenant en compte la hauteur totale de la section de l'élément à renforcer (ex : pour une poutre en T, il convient de considérer la hauteur totale de la section avec la table de compression). Elle consiste en une vérification de l'élément à la rupture, toutes redistributions effectuées, et sans tenir compte du renforcement, sous la combinaison ELS rare (considérée conventionnellement dans les calculs comme combinaison ELU fondamentale)  $G+Q1+\sum\psi_{0i}Q_i$ , où G représente la sollicitation due à la charge permanente et  $\sum\psi_{0i}Q_i$  celle due aux charges de courte durée d'application dites d'accompagnement de l'action de base Q1, y compris s'il y a lieu les charges climatiques et celles dues aux instabilités.

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

- **(R1) ≥ 0,63 (S2)**, dans le cas d'un élément principal, dont la rupture est susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (poutre porteuse, par exemple) ;
- **(R1) ≥ 0,50 (S2)**, dans le cas d'un élément secondaire, dont la rupture n'est pas susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (panneaux de dalles de planchers posés sur poutres, par exemple).

Avec, dans ces expressions :

- **R1** : capacité résistante à l'ELU, en situation fondamentale, de l'élément non renforcé ;
- **S2** : sollicitation agissante à l'ELU, en situation fondamentale, sur l'élément renforcé.

### 2.4.5. Longueur et forces d'ancrage

#### 2.4.5.1. Adhérence S&P C-Laminate –lamelles collées en surface (Zulassung Z-36.12-76)

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

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

**Avec :**

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

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

Minimum pour les lamelles : 1.50 N/mm<sup>2</sup>

Maximum lamelles : 3.00 N/mm<sup>2</sup>

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

$$l_{b,max} = 1,46 \times \sqrt{\frac{E_f \times n_f \times l_f}{\sqrt{f_{csd} \times f_{cd,cube}}}} \quad (mm) \quad (3)$$

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

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

#### 2.4.5.2. Adhérence S&P C-Laminate – lamelles engravées

Au contraire des lamelles collées superficiellement, les lamelles engravées dans des rainures peuvent être utilisées jusqu'à la résistance à la traction du matériau. On peut décrire la force de traction reprise par l'adhérence de la lamelle  $F_{bd}$  en fonction de la longueur d'ancrage  $l_b$  :

$$F_{bd} = m_f \times b_f \times \tau_{k,d} \times \sqrt[4]{\alpha_r} \times l_b \times (0,4 - 0,0015 \times l_b) \times 0,95 \quad \text{pour } l_b \leq 115 \text{ mm} \quad (5)$$

$$F_{bd} = m_f \times b_f \times \tau_{k,d} \times \sqrt[4]{\alpha_r} \times \left(26,2 + 0,065 \times \tanh\left(\frac{\alpha_r}{70}\right) \times (l_b - 115)\right) \times 0,95 \quad \text{pour } l_b > 115 \text{ mm} \quad (6)$$

avec  $\tau_{k,d} = \frac{\tau_{k,K}}{\gamma_b}$  et  $\gamma_b = 1,5$

\*Les valeurs de  $\tau_{k,K}$  pour les différentes résines peuvent être obtenues chez S&P Renforcement France.

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

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

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

En cas d'utilisation des colles S&P Resin 220 et 220 HP

À l'ELU et combinaisons accidentelles :  $\tau_{m, \text{lim}, \text{ELU}} = \min(1,5; \frac{f_{tk}}{1,5})$  ;

À l'ELS :  $\tau_{m, \text{lim}, \text{ELS}} = \min(1,0; \frac{f_{tk}}{2})$  .

En cas d'utilisation des colles S&P Resin 55 et 55 HP

À l'ELU et combinaisons accidentelles :  $\tau_{m, \text{lim}, \text{ELU}} = \min(1,5; \frac{f_{tk}}{1,5})$  ;

À l'ELS :  $\tau_{m, \text{lim}, \text{ELS}} = \min(1,0; \frac{f_{tk}}{2})$  .

---

## 2.5. Dimensionnement selon l'Eurocodes 2

---

### 2.5.1. Hypothèses de calcul

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

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

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

$$E_{df} \leq R_{df} \quad (7)$$

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

### 2.5.2. Renforcement en flexion du béton armé

#### Principe :

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

#### 2.5.2.1. Forces internes

$$\text{Acier } F_s = E_s \times A_s \times \varepsilon_s \leq A_s \times \left(\frac{f_{yk}}{\gamma_s}\right) \quad (8)$$

FRP  $F_f = E_{fd} \times A_f \times \varepsilon_f$  avec  $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{f,ELU}; \varepsilon_{f,ELS}$  (9)

Béton  $F_c = b \times \alpha_r \times (f_{ck} / \gamma_c)$  (10)

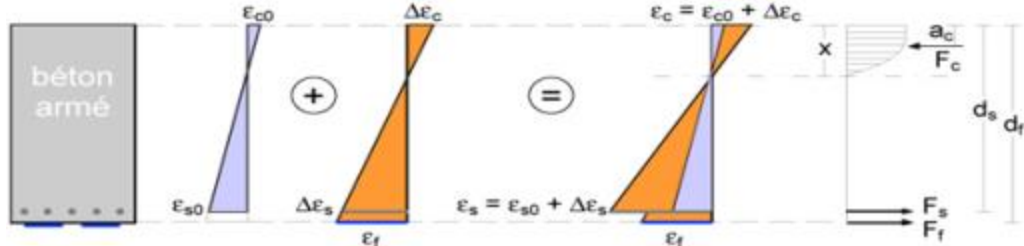
avec ( $\alpha_r$  : paramètre de la courbe parabol.)

2.5.2.2. Conditions d'équilibre

$\sum H = 0 \rightarrow F_c - F_s - F_f = 0$  (11)

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

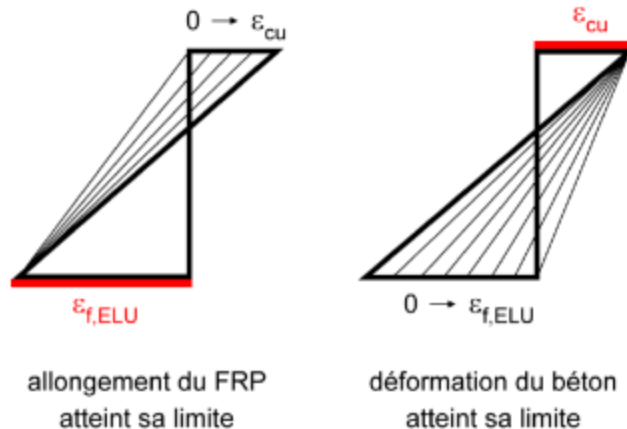
La résolution des conditions d'équilibre s'effectue itérativement en variant les allongements dans la zone comprimée et la zone tendue. Les conditions d'équilibre sont contrôlées en passant les différents états d'allongement.



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

2.5.2.3. État limite ultime

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



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

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

$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rdo}} \leq \left(\frac{1}{0,63}\right)$  (13)

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

$\eta_M = \frac{M_{Edf}}{M_{Rdo}} \leq \left(\frac{1}{0,5}\right)$  (14)

2.5.2.4. État de service

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

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



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

### 2.5.3. Renforcement en flexion du béton précontraint

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

Le logiciel ne prend en compte que la part du moment de précontrainte isostatique. Si l'élément précontraint est hyperstatique, il faut ajouter la part du moment hyperstatique de précontrainte  $M_p$ , aux moments dus aux charges  $M_{Ek0}$ ,  $M_{Edf}$  et  $M_{Ekf}$ .

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

Le point  $E$  pour lequel la vérification de l'ancrage est effectuée correspond dans ce cas à l'endroit auquel le moment agissant  $M_E$  atteint le moment de fissuration  $M_{cr}$  de la section. Cette procédure de vérification est donnée dans le paragraphe 2.7.

#### 2.5.3.1. Forces internes

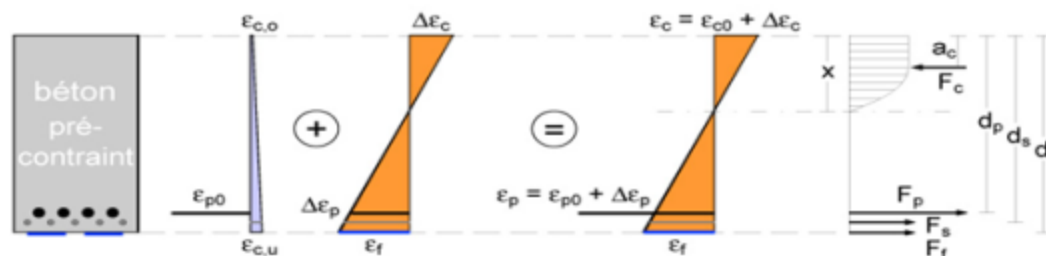
Le paragraphe 2.5.2.1 s'applique.

#### 2.5.3.2. Conditions d'équilibre

Le paragraphe 2.5.2.2 s'applique en considérant l'effort  $F_p$ .

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

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



#### 2.5.3.3. État limite ultime

Le paragraphe 2.5.2.3 s'applique en considérant les armatures précontraintes.

#### 2.5.3.4. État de service

Le paragraphe 2.5.2.4 s'applique. De plus, Il convient de s'assurer que la section d'enrobage est complètement comprimée sous les combinaisons quasi permanentes.

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

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

## 2.6. Dimensionnement selon le BAEL et le BPEL 91 révisés 99

### 2.6.1. Hypothèses de calcul

Les calculs sont menés conformément au BAEL et BPEL. Les hypothèses de calcul retenues sont semblables à celles décrites pour le dimensionnement selon l'Eurocode 2. Les coefficients de sécurité et les combinaisons des charges sont ceux des règlements BAEL et BPEL.

Comme pour le calcul à l'Eurocode 2 présenté précédemment, le calcul selon le BAEL et le BPEL doit prendre en considération l'état de déformation initial de la section à renforcer (spécifiquement au moment des travaux de renforcement). Pour procéder au dimensionnement/vérifications à l'ELU et l'ELS, il convient de superposer l'état d'allongement dû à l'état initial à celui dû à la sollicitation supplémentaire à l'état renforcé.

## 2.6.2. Notations complémentaires utilisées dans cette section

### Matériaux

$f_{cj}(f_{tj})$  : résistance caractéristique à la compression (traction) du béton à j jours

$f_e$  : limite d'élasticité de l'acier

$f_{ed}$  : contrainte de dimensionnement retenue pour l'acier ( $f_{ed} = \frac{f_e}{\gamma_s}$ )

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

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

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

$\sigma_s$  : contrainte dans l'acier tendu

$\sigma_{s'}$  : contrainte dans l'acier comprimé

$\sigma_f$  : contrainte dans les fibres

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

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

$E_f$  : module d'élasticité de la fibre utilisée

### Sollicitations

$M_u$  : moment sollicitant la section à l'ELU

$M_s$  : moment sollicitant la section à l'ELS

$V_u$  : tranchant sollicitant la section à l'ELU

$\tau_u$  : contrainte tangente à l'ELU

### Calcul BA ELU-ELS

$\gamma_u$  : distance de l'Axe Neutre à la déformation de la fibre la plus comprimée (ELU)

$Z$  : bras de levier

$I_1$  : moment d'inertie de la section homogène

$\gamma_0$  : distance de l'Axe Neutre à la déformation de la fibre la plus comprimée (ELS)

$f_{ctm}$  : valeur de la résistance à la traction superficielle du béton

$f_{ctd}$  : valeur de calcul de la résistance à la traction superficielle du béton

### Calcul BP ELU-ELS

$f_{prg}$  : charge de rupture garantie

$\eta$  : coefficient de fissuration

$B_t$  : aire du béton tendu

$\sigma_{Bt}$  : valeur absolue de la contrainte maximale de traction

$N_{Bt}$  : résultante des contraintes de traction correspondantes (calculées en section non fissurée en classe 2 et 3)

$B_n$  : épaisseur nette

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

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

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

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

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

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

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

## 2.6.3. Renforcement en flexion du béton armé

### 2.6.3.1. Forces internes

Le paragraphe 2.5.2.1 s'applique.

### 2.6.3.2. Conditions d'équilibre

Le paragraphe 2.5.2.2 s'applique.

### 2.6.3.3. État limite ultime

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

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

avec :

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

et

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

#### 2.6.3.4. État de service

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

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

avec :

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

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

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

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

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

### 2.6.4. Renforcement en flexion du béton précontraint

#### 2.6.4.1. Forces internes

Le paragraphe 2.5.2.1 s'applique.

#### 2.6.4.2. Conditions d'équilibre

Le paragraphe 2.5.2.2 s'applique en considérant l'effort  $F_p$ .

#### 2.6.4.3. État limite ultime

Le paragraphe 2.6.3.3 s'applique en considérant les armatures précontraintes.

#### 2.6.4.4. État de service

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

##### **classe 1 :**

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

##### **classe 2 :**

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

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

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

sous combinaison rare :  $f_{tj}$  dans la section d'enrobage ;  $1,5 \times f_{tj}$  ailleurs

sous combinaison fréquente : 0 dans la section d'enrobage

**classe 3 :**

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

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

Les limitations de contrainte sont les suivantes :

- pour le béton :  $0,6 \times f_{cj}$  sous combinaison rare (ou  $0,5 \times f_{cj}$  sous combinaison quasi permanente)
- pour les aciers passifs :

en combinaison rare  $\min\{\frac{2}{3} \times f_e; \max(0,5f_e; 110 \times \sqrt{\eta \times f_{tj}})\}$ ;

en combinaison fréquente :  $0,35 \times f_e$  (concerne uniquement la surtension des armatures)

- pour les aciers de précontraintes :

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

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

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

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

- pour les fibres de carbone :  $\sigma_f$

**Aciers minimum :**

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

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

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

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

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

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

**2.7. Vérification de l'ancrage d'extrémité FRP**

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

$$F_{bd} \geq F_{fd} \quad (15)$$

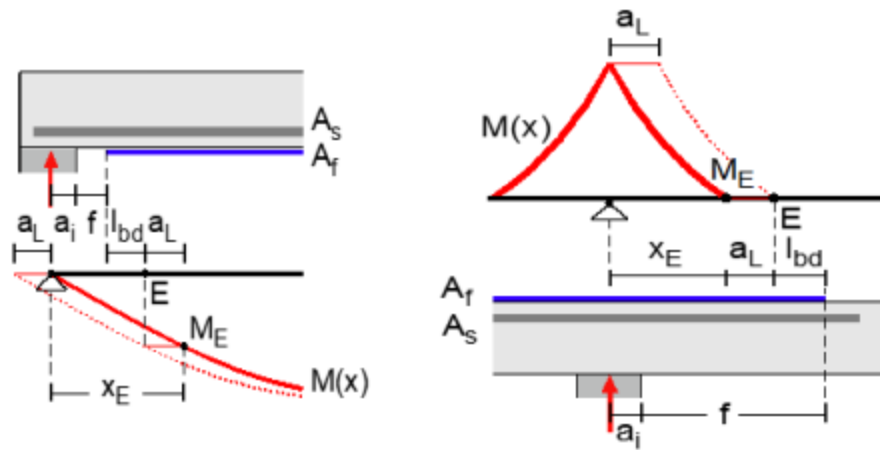
La force de traction FRP de calcul  $F_{fd}$  est déterminée par une itération de l'équilibre à partir du moment donné.  $F_{bd}$  est la valeur de dimensionnement de la force de rupture de l'adhérence au point  $E$ . Elle se calcule à partir des caractéristiques des sections FRP choisies et de la résistance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

**2.7.1. Systèmes FRP collés en surface**

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

$$X_E = a_i + f + l_{bd} + a_L \quad \text{avec} \quad f \geq 5\ cm \quad (16)$$

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



### 2.7.1.1. Lamelles engravées

Au contraire des systèmes FRP collés en surface, les lamelles S&P C-Laminate engravées peuvent être ancrées à partir du point où, selon le calcul, elles ne sont plus nécessaires pour couvrir la force de traction. Il s'agit de l'endroit auquel le moment agissant atteint la capacité portante flexionnelle  $M_{Rd0}$  de la section non renforcée. Le point E pour lequel la vérification de l'ancrage est effectuée est déterminé par la condition  $M_E = M_{Rd0}$ .

## 2.8. Vérification de la contrainte d'entraînement

La contrainte d'entraînement  $\tau_m$  à l'interface composite-béton doit être inférieure aux contrainte admissible  $\tau_{m, lim}$  (cf. paragraphe 2.4.5.3).

$$\text{pour les lamelles collées en surface} \quad \tau_m = \frac{F_f}{F_s + F_f} \cdot \frac{V_{Ed}}{b_f \cdot Z}$$

$$\text{pour les lamelles engravées} \quad \tau_m = \frac{F_f}{F_s + F_f} \cdot \frac{V_{Ed}}{2b_f \cdot Z}$$

avec :

$V_{Ed}$  valeur de l'effort tranchant sollicitant à la section vérifiée ;

$F_f$  et  $F_s$  forces respectives dans le composite et les armatures longitudinales, à la section vérifiée ;

$Z$  bras de levier interne entre l'effort de compression et les efforts de traction des armatures (aciers longitudinaux et composite).

## 2.9. Règles constructives

### Lamelles S&P C-Laminate collées en surface

Distance au bord  $a_{r, min} = c_w$

Entraxe en fonction de la portée  $S_{f, max} = 0,2 \times L$

Entraxe en fonction du porte-à-faux  $S_{f, max} = 0,4 \times L$

Entraxe en fonction de l'ép. de la dalle  $S_{f, max} = 5 \cdot h$

Nombre de couches de S&P C-Laminate  $n_{f, max} = 2$

### Lamelles S&P C-Laminate engravées

Rainure

$$t_{s, max} = c_w - 5 \quad [\text{mm}]$$

$$b_{s, min} = t_f + 1 \quad [\text{mm}]$$

$$b_{s, max} = t_f + 3 \quad [\text{mm}]$$

Distance au bord  $a_{r, min} = \min(2b_f; d_k)$

Entraxe  $S_{f, min} = d_k$  ou  $b_f$  (si  $a_s \geq 2d_s$ )

Entraxe en fonction de la portée  $S_{f, max} = 0,2 \times L$

Entraxe en fonction du porte-à-faux  $S_{f, max} = 0,4 \times L$

Entraxe en fonction de l'ép. de la dalle  $S_{f, max} = 4 \cdot h$

Dans les équations de cette section les notations sont explicitées ci-dessous :

$c_w$  enrobage de béton des armatures d'effort tranchant

- a<sub>r</sub> distance entre axe des lamelles et bord libre de l'élément
- S<sub>r</sub> entraxe entre les lamelles
- n<sub>r</sub> nombre de couche de lamelle
- t<sub>s</sub> profondeur de la rainure dans le béton
- b<sub>s</sub> largeur de la rainure dans le béton
- t<sub>r</sub> épaisseur de l'armature FRP
- b<sub>r</sub> largeur de l'armature FRP
- d<sub>k</sub> diamètre du plus gros grain du béton
- L portée ou porte à faux de l'élément renforcé

---

## 2.10. Dispositions de mise en œuvre

---

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

### 2.10.1. Préparation et contrôles

#### 2.10.1.1. Détermination de la résistance à la traction du support

##### **Cohésion du support**

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

La valeur minimale de résistance à la traction du support selon EN 1542 pour les lamelles S&P C-Laminate est :  $\geq 1.5 \text{ N/mm}^2$ .

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

La valeur moyenne  $\beta_t$  établie sur la base de 3 essais au minimum ne doit pas être inférieure à la valeur  $\geq 1.5 \text{ N/mm}^2$ .

##### **Primaire**

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

#### 2.10.1.2. Planéité de la surface de béton préparée

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

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

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

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

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

#### 2.10.1.3. Réalisation des engravures

Les engravures dans le béton sont réalisées par sciage. L'enrobage et la position des aciers doivent être vérifiés au préalable pour éviter leur endommagement. Si le lit supérieur est parallèle au sens des lamelles engravées, il peut être envisagé de positionner les lamelles engravées entre les aciers existants.

#### 2.10.1.4. Détermination du point de rosée

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

#### 2.10.1.5. Humidité du support en béton

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

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

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

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

L'humidité du support peut également être déterminé par un humidimètre adapté au matériau béton.

Humidité maximale du support en fonction des produits de collage :

| Produit de collage               | Humidité maximale du support |
|----------------------------------|------------------------------|
| S&P Resin 220 / S&P Resin 220 HP | 4 %                          |
| S&P Resin 230 / S&P Resin 230 HP | 4 %                          |
| S&P Resin 55 / S&P Resin 55 HP   | 4 %                          |

### 2.10.1.6. Préparation mécanique du support

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

Avant collage, le support doit être parfaitement dépoussiéré.

## 2.10.2. Mise en œuvre des lamelles S&P C-Laminate collées en surface

### 2.10.2.1. Nettoyage / préparation des Lamelles S&P C-Laminate

Nettoyer les lamelles à l'aide d'un chiffon blanc imbibé de produit de nettoyage à base de solvant non gras. Outre les impuretés en général, on éliminera ainsi également la poussière de carbone. Le nettoyage doit s'effectuer jusqu'à ce que le chiffon blanc ne comporte plus la moindre trace noire de carbone.

### 2.10.2.2. Mélange de la colle S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

| Produit          | D.P.U.<br>à 20 °C | Humidité<br>du support | Température<br>d'application |
|------------------|-------------------|------------------------|------------------------------|
| S&P Resin 220    | ~ 60 min.         | < 4 %                  | +8 °C à +35 °C               |
| S&P Resin 220 HP | ~ 90 min.         |                        |                              |

### 2.10.2.3. Application de la colle

La lamelle en fibres de carbone soigneusement nettoyée et complètement sèche est enduite de colle époxy S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP à l'aide d'une spatule pour les petites longueurs ou à l'aide d'un appareil d'encollage spécifique « S&P Tire-colle ». La lamelle S&P C-Laminate en fibres de carbone est ensuite appliquée par simple ou double encollage sur le support hors poussière en respectant une épaisseur de couche de colle sera de 2 mm en moyenne (minimum 1 mm – maximum 3 mm).

### 2.10.2.4. Collage des Lamelles S&P C-Laminate sur le béton

La lamelle en fibres de carbone est fixée sur la surface en béton avec une légère pression de la main. Grâce à la très bonne stabilité de la colle époxy S&P Resin 220 et S&P Resin 220 HP, il n'est pas nécessaire d'utiliser des accessoires de calage. La lamelle S&P C-Laminate est ensuite marouflée de telle sorte que de la colle fraîche ressorte des deux côtés de celle-ci. On a ainsi l'assurance que la colle a été appliquée sans qu'il subsiste le moindre vide. La colle qui a débordée peut-être éliminée à l'aide d'une spatule. L'épaisseur de la couche de colle sera de 2 mm en moyenne (minimum 1 mm – maximum 3 mm). D'éventuels restes de colle à la surface des lamelles peuvent être éliminés avec le produit de nettoyage à base de solvant (acétone ou MEK) tant que la colle n'a pas durci. D'autres Lamelles S&P C-Laminate peuvent être collées parallèlement en respectant un écartement minimum de 5 mm. Il est possible de superposer 2 lamelles ou de croiser des lamelles par application frais sur frais.

En cas d'application ultérieure d'un revêtement de protection sur les lamelles, on procédera à l'application sur la lamelle d'une couche de S&P Resin 220, S&P Resin 220 HP, S&P Resin 55, S&P Resin 55 HP à l'aide d'une spatule ou d'une brosse ; et frais sur frais on procédera à une projection de sable de quartz propre, sec et calibré.

## 2.10.3. Mise en œuvre des lamelles S&P C-Laminate engravées

### 2.10.3.1. Nettoyage / préparation des Lamelles S&P C-Laminate

Nettoyer les lamelles à l'aide d'un chiffon blanc imbibé de produit de nettoyage à base de solvant non gras. Outre les impuretés en général, on éliminera ainsi également la poussière de carbone. Le nettoyage doit s'effectuer jusqu'à ce que le chiffon blanc ne comporte plus la moindre trace noire de carbone.

### 2.10.3.2. Mélange de la colle S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

| Produit          | D.P.U.<br>à 20 °C | Humidité<br>du support | Température<br>d'application |
|------------------|-------------------|------------------------|------------------------------|
| S&P Resin 220    | ~ 60 min.         | < 4 %                  | +8 °C à +35 °C               |
| S&P Resin 220 HP | ~ 90 min.         |                        |                              |

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

On respectera les instructions des fiches techniques S&P.

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

### 2.10.3.4. Collage des Lamelles S&P C-Laminate engravées

La colle époxy est appliquée dans les rainures préalablement réalisées :

- Surfaces horizontales : S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP
- Surfaces non horizontales : S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP

La lamelle en fibres de carbone soigneusement nettoyée et complètement sèche est ensuite introduite dans la rainure et calée.

## 2.10.4. Contrôles qualité après la pose des S&P C-Laminate

### 2.10.4.1. Liaison S&P C-Laminate colle et béton

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

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

Il est possible de procéder à des essais de traction selon la norme EN 1542 sur les lamelles S&P C-Laminate. Cela implique d'avoir appliqué des éléments supplémentaires dédiés à ces essais.

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

#### 2.10.4.1.1. Planéité des éléments S&P C-Laminate collés

La planéité du S&P C-Laminate collées en surface sera contrôlée immédiatement après l'application. Les règles du paragraphe 2.10.1.2 s'appliqueront.

#### 2.10.4.1.2. Contrôle des vides entre la colle et le support

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

## 2.10.5. Revêtement des éléments de renfort

### 2.10.5.1. Revêtements de protection

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

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

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

### 2.10.5.2. Protection au feu

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

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

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

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

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



En cas d'application d'un flocage appliqué directement sur les lamelles S&P C-Laminate, la surface des lamelles devra être parfaitement dégraissée et recevoir une couche de liaison (couche de S&P Resin 220 ou S&P Resin 220 HP ou S&P Resin 55 ou S&P Resin 55 HP sablée).

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

Le procédé de renfort C-Laminate admet des températures au niveau du collage en service continu et en pointe telles qu'indiquées au paragraphe 2.2.2.3.

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

### 2.10.6. Sécurité du travail

#### 2.10.6.1. Allergies

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

#### 2.10.6.2. Découpe et ponçage de S&P C-Laminate

Les poussières fines qui sont produites lors du ponçage et du sciage sont dangereuses pour la santé.

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

#### 2.10.6.3. Traitement et gestion des déchets de résines époxy

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

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

---

## 2.11. Assistante technique

---

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

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 par S&P Renforcement. Chaque personne formée, reçoit une attestation de formation nominative.

S&P met à disposition des calculateurs des logiciels de dimensionnement développés en interne. Le dimensionnement du renforcement doit être réalisé par un bureau d'étude de structure compétent et formé à l'utilisation des logiciel S&P Renforcement. La responsabilité des résultats fournis par les logiciels revient au titulaire. Toutefois, le bureau d'étude structure utilisateur du logiciel reste responsable de la bonne utilisation des logiciels suivant le cahier des charges fourni, de la définition des hypothèses et des données d'entrée ainsi que de l'interprétation des résultats.

---

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

---

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

La fabrication des éléments constitutifs du procédé S&P C-Laminate fait l'objet d'un suivi de production réalisé dans le cadre de procédures internes d'autocontrôle et d'un contrôle externe une fois par an par le CSTB sur la base du référentiel « Document Technique – Renforcement des structures par collage de matériaux composites » du 22/07/2021.

---

## 2.13. Résultats expérimentaux

---

- Essai de détermination du module d'élasticité en compression, Applus Laboratories, année 2016 ;
- Essai de détermination de la résistance à la compression, Applus Laboratories, année 2016 ;
- Essai de détermination de la transition vitreuse, Applus Laboratories, année 2016 ;
- Essai de détermination de l'adhérence acier sur acier, Applus Laboratories, année 2016 ;
- Essai de traction directe sur composite, S&P, année 2019 ;
- Essai de cisaillement par double recouvrement, LMC<sup>2</sup>, année 2018 ;
- Essai de cisaillement interlaminaire, LMC<sup>2</sup>, année 2018.

---

## 2.14. Références chantiers

---

### C-Laminate SM

| <b>Désignation du chantier</b>   | <b>Année</b> |
|--|--------------|
| Centre Commercial Le Merlan, Marseille                                     | 2018         |
| Tour Trinity, La Défense   | 2018         |
| Centre commercial Casino, Le Cannet  | 2018         |
| Parking Zola, Villeurbanne   | 2018         |
| Parking Debourg, Lyon  | 2018         |
| Maison Viard, Ecully   | 2018         |
| Parking Halles, Lyon   | 2018         |
| CHU Estaing, Clermont-Ferrand  | 2018         |
| CHU, Limoges   | 2018         |
| Centre hospitalier   | 2018         |
| Gare SNCF, L'Etang la Ville  | 2018         |
| Syctom, Ivry sur Seine   | 2018         |
| Cimenterie Lafarge, Bouc Bel Air   | 2018         |
| Centre hospitalier, Périgueux  | 2018         |
| Parvis des Halles, Renforcement de dalles et de poutres, La Roches sur Yon | 2020         |
| Bâtiment New Age, Renforcement de dalles et de poutres, Lyon               | 2022         |
| Résidence OPUS, Renforcement de radier de parking, La Rochelle             | 2023         |

### C-Laminate HM

| <b>Désignation du chantier</b> | <b>Année</b> |
|--------------------------------|--------------|
| Corolles, Puteaux              | 2016         |
| CHU Montpied, Clermont-Ferrand | 2016         |
| Les Lauriers, Marseille        | 2017         |
| Résidence, Houilles            | 2017         |
| Servier, Orléans               | 2017         |

---

## **2.15. Annexes du Dossier Technique**

---

### 2.15.1. Annexe 1 : Caractéristiques mécaniques du composite

**Tableau 1 : Caractéristiques du composite à la rupture**

| Types de lamelles | Modules élastique<br>valeur moyenne<br>(GPa) | Module élastique<br>caractéristique<br>(GPa) | Contrainte de<br>traction à la rupture<br>Valeur moyenne<br>(MPa) | Contrainte<br>caractéristique de<br>traction à la rupture<br>(MPa) | Allongement à la<br>rupture (‰) |
|-------------------|--|--|---|--|---------------------------------|
| S&P C-Laminate SM | ≥170   | ≥168   | ≥2800   | ≥2700  | ≥16                             |
| S&P C-Laminate HM | ≥205   | ≥201   | ≥2800   | ≥2700  | ≥13.5                           |

**Tableau 2 : Caractéristiques du composite à l'ELU**

| Désignation                            | Symbole               | Unité | S&P C-Laminate<br>SM | S&P C-Laminate<br>HM |
|--|-----------------------|-------|----------------------|----------------------|
| Module d'élasticité (valeur de calcul) | $E_{fd}$              | MPa   | 170 000              | 205 000              |
| Contrainte de dimensionnement à l'ELU  | $f_{,ELU}$            | MPa   | 1 445                | 1450                 |
| Allongement de dimensionnement à l'ELU | $\varepsilon_{f,ELU}$ | ‰     | 8,5                  | 7,07                 |

**Tableau 3: Caractéristiques du composite à l'ELS**











| Désignation                            | Symbole               | Unité | S&P C-Laminate SM | S&P C-Laminate HM |
|--|-----------------------|-------|-------------------|-------------------|
| Module d'élasticité (valeur de calcul) | $E_{fd}$              | MPa   | 170 000           | 205 000           |
| Contrainte de dimensionnement à l'ELS  | $f_{,ELS}$            | MPa   | 1 300             | 1300              |
| Allongement de dimensionnement à l'ELS | $\varepsilon_{f,ELS}$ | ‰     | 7,64              | 6,34              |

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

|  |  |
|--|--|
| Projet : .....<br>Adresse : .....<br>Lieu : .....<br>Elément de construction : ..... | No. de projet : .....<br>Date : .....<br>Personne compétente : .....<br>Tel. : ..... |
|--|--|

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

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

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

Tampon, Signature :

**2.15.3. Annexe 3 : Fiche d'autocontrôle type**

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

**Les mesures suivantes doivent être effectuées et enregistrées :**

**Exigences:** température du support: **8° < t° < 30°C**

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

Humidité du béton: **< 4 %**

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

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

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

Tampon, Signature :

## 2.15.4. Annexe 4 : Tableau des points de rosée

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

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