

APPRECIATION TECHNIQUE D'EXPERIMENTATION

Numéro de référence CSTB : 3190_V1

ATEx de cas a

Validité du 25/04/2023 au 25/04/2025



Copyright : SIKA France

L'Appréciation Technique d'expérimentation (ATEx) est une simple opinion technique à dire d'experts, formulée en l'état des connaissances, sur la base d'un dossier technique produit par le demandeur. *(extrait de l'art. 24)*

A LA DEMANDE DE :

SIKA France

84 RUE EDOUARD VAILLANT

93350 LE BOURGET

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – Siret 775 688 229 00027 – www.cstb.fr

Établissement public à caractère industriel et commercial – RCS Meaux 775 688 229 – TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / NANTES / SOPHIA ANTIPOLIS

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 1390_V1

Note Liminaire : Cette Appréciation porte essentiellement sur le procédé de renforcement des structures en béton armé ou en béton précontraint par collage de lamelles et barres pultrudées en carbone dans des engravures.

Selon l'avis du Comité d'Experts en date du 25/04/2023, le demandeur ayant été entendu, la demande d'ATEX ci-dessous définie :

- Demandeur : Sika France
- Technique objet de l'expérimentation :
 - Procédé de renforcement d'éléments de structure, consistant à coller dans des engravures sur la surface des éléments visés des lamelles ou barres pultrudées en fibres de carbone (CarboDur NSM S ou Sika CarboDur BC) à l'aide d'une résine époxydique synthétique à deux composants.

Cette technique est définie dans le dossier enregistré au CSTB sous le numéro ATEX 3190_V1 et résumé dans la fiche sommaire d'identification ci-annexée,

donne lieu à une :

APPRECIATION TECHNIQUE FAVORABLE A L'EXPERIMENTATION

Remarque importante : Le caractère favorable de cette appréciation ne vaut que pour une durée limitée au **25 avril 2025**, et est subordonné à la mise en application de l'ensemble des recommandations formulés au §4.

Cette Appréciation, QUI N'A PAS VALEUR D'AVIS TECHNIQUE au sens de l'Arrêté du 21 mars 2012, découle des considérations suivantes :

1°) Sécurité

1.1 – Stabilité des ouvrages et/ou sécurité des équipements

Le procédé Sika CarboDur (S NSM et BC) se compose d'une lamelle ou d'une barre carbone collée et ancrée dans des engravures dans un élément de structure en béton armé ou précontraint, la liaison des lamelles est assurée par une résine époxy conforme à la norme NF EN 1504-4. Le procédé peut être utilisé pour reprendre les efforts de flexion et/ou en traction.

Le dimensionnement des renforts est réalisé conformément aux règles TR 55 et à la norme NF EN 1992-1-1.

Des essais ont été réalisés sur les différents procédés, afin de vérifier la conformité de ces derniers vis-à-vis des règles précitées.

1.2 – Sécurité des intervenants

La sécurité des intervenants est considérée comme normalement assurée moyennant l'utilisation des dispositifs de manutention et le respect des prescriptions décrites dans le dossier technique et les recommandations TR 55.

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.

1.3 – Sécurité en cas d'incendie

En ce qui concerne la résistance au feu, le système 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.

1.4 – Sécurité en cas de séisme

Les utilisations pour lesquelles l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié impose l'application des règles parasismiques ne sont pas visées dans le cadre de la présente ATEX.

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 1390_V1

2°) Faisabilité

2.1 – Production

Le procédé CARBODUR est fabriqué par des usines spécialisées. La fabrication des lamelles fait l'objet d'un plan d'assurance-qualité. Chaque lot livré au titulaire fait l'objet d'essais de contrôle interne portant notamment sur : le module d'élasticité, la densité et l'allongement à la rupture chaque 3000 m de lamelles.

La colle utilisée pour le système est une résine époxydique à deux composants, thixotrope ou liquide, fabriquée spécialement pour l'usage défini dans le dossier examiné par des usines SIKA AG en Autriche. Les résines bénéficient d'un marquage CE conformément à la norme NF EN 1504-4.

2.2 – Mise en œuvre :

La mise en œuvre correcte du procédé exige un personnel formé spécialement aux opérations de renforcement par collage de lamelles engravées. Un plan d'assurance qualité pour chaque chantier a été établi et intègre les éléments techniques spécifiques des procédés (vérification par pastillage, condition des supports, tolérances, détails des points singuliers).

La mise en œuvre doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans le dossier technique établi par le demandeur, notamment en ce qui concerne le nettoyage et la préparation des supports ainsi que la réalisation des essais de convenances sur ce dernier.

2.3 – Assistance technique

La conception et le calcul des renforcements sont à la charge du Bureau d'Études Techniques formé par le service d'assistance technique de SIKA France. Leur service d'assistance technique fournit sur demande une assistance technique en phase de conception et de préparation à l'exécution du procédé. Un logiciel de dimensionnement du procédé est tenu à disposition des bureaux d'études.

3°) Risques de désordres

Une attention particulière doit être apportée, pour la vérification de la mise en œuvre des lamelles engravées en partie inférieure et/ou supérieure, notamment au niveau des encoches, afin de s'assurer du bon remplissage de la résine en respectant l'enrobage entre le béton et la lamelle, et donc d'une bonne adhérence entre les deux matériaux.

4°) Recommandations

Il est recommandé de :

- Réaliser les essais de pastillages avant et après renforcement afin de valider l'adhérence entre les différents matériaux ;
- Fournir pour chaque chantier une fiche d'auto-contrôle précisant notamment les conditions de réticulation qui sont fondamentales pour le bon fonctionnement du procédé ;
- Dans le cas d'utilisation aux bords de mer, une distance de 2000 m minimum à respecter.

EN CONCLUSION

En conclusion et sous réserve de la mise en application des recommandations et attendus ci-dessus, le Comité d'Experts considère que :

Conclusion FAVORABLE

- La sécurité est *assurée*,
- La faisabilité est, *réelle*,
- Les désordres sont *minimes*.

Champs sur Marne,
Le Président du Comité d'Experts,

Ménad CHENAF

ANNEXE 1

FICHE SOMMAIRE D'IDENTIFICATION (1)

Demandeur : Société **SIKA France**
84 RUE EDOUARD VAILLANT
93350 LE BOURGET

Définition de la technique objet de l'expérimentation :

- Le procédé faisant l'objet de l'ATEX consiste à coller dans des engravures sur la surface des éléments visés des lamelles ou barres à l'aide d'une résine époxydique bi-composante. Ce procédé est destiné à augmenter la capacité portante des éléments concernés, par fonctionnement mécanique conjoint lamelle ou barre en fibre de carbone et la structure en béton, grâce à l'adhérence conférée par la résine après son durcissement, entre les deux matériaux;
- Le procédé est utilisé pour le renfort de poutres ou de dalles à la flexion ;
- La technique consiste d'abord en une préparation du support par nettoyage, ponçage et rainurage, puis de l'imprégnation proprement dite ;
- Un ragréage ou reprofilage préalable est opéré si nécessaire. Ensuite, il est procédé à la mise en place des lamelles ou barres SIKACARBODUR. Des contrôles sont effectués tout au long du processus : contrôles préalables, en cours de mise en œuvre, et finaux ;
- SIKACARBODUR sont des lamelles ou des barres pultrudées à matrice époxy ;
- Le dimensionnement du renforcement proposé est justifié par une note de calculs prenant en compte les caractéristiques mécaniques des matériaux. Pour les colles, ces caractéristiques sont vérifiées par des contrôles sur des prélèvements et teste ;
- Un essai de pastillage est obligatoire, pour déterminer la contrainte de cisaillement dans le béton. Le procédé n'est pas applicable si les essais de pastillage donnent une contrainte inférieure à 1.5 MPa.

(1) La description complète de la technique est donnée dans le dossier déposé au CSTB par le demandeur et enregistré sous le numéro ATEx 2885_V1 et dans le cahier des charges de conception et de mise en œuvre technique (cf. annexe 2) que le fabricant est tenu de communiquer aux utilisateurs du procédé.

ANNEXE 2

CAHIER DES CHARGES DE CONCEPTION ET DE MISE EN OEUVRE

Ce document comporte 23 pages.

Procédé de Sika CarboDur (S NSM et BC)

« Dossier technique établi par le demandeur »

Version tenant compte des remarques formulées par le comité d'Experts

Datée du 25/04/2025

A été enregistré au CSTB sous le n° d'ATEX 3190_V1.

Fin du rapport

APPRECIATION TECHNIQUE D'EXPERIMENTATION

ATEX cas A

Sika CarboDur® S NSM/ Sika CarboDur® BC

Demandeur : Sika France
84, rue Edouard Vaillant
FR-93350 LE BOURGET

Table des matières

1.	Définition de la technique objet de l'expérimentation	4
2.	Domaine d'emploi	4
2.1	Agressivité de l'environnement	4
2.2	Zones géographiques d'utilisation	4
2.3	Sécurité en cas d'incendie : Réaction au feu	4
2.4	Résistance au feu	4
2.5	Sécurité en cas de séisme	5
2.6	Prévention des accidents lors de la mise en œuvre ou de l'entretien	5
2.7	Données environnementales	5
2.8	Fabrication et contrôles	5
2.9	Prescriptions techniques	5
2.10	Conditions de mise en œuvre	5
3.	Eléments et Matériaux	5
3.1	Lamelles / barres à engraver Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC	6
3.2	Colles et résines	6
3.2.1	Températures de service	7
3.3	Produits complémentaires	7
4.	Calcul et conception suivant le référentiel TR55 – NF EN 1992-1-1	8
4.1	Notations	9
4.2	Lois de comportement des matériaux	9
4.2.1	Loi de comportement du béton	10
4.2.2	Loi de comportement de l'acier	10
4.2.3	Loi de comportement et caractéristiques des renforts Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC	10
4.3	Règles pour le dimensionnement du renforcement de structures en béton armé suivant le référentiel TR55 – NF EN 1992-1-1 11	
4.3.1	Introduction	11
4.3.2	Dimensionnement à l'ELU	11
4.3.3	Méthodologie de calcul (ELU)	12
4.3.4	Vérifications à l'ELS	12
4.4	Vérifications particulières Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC	13
4.4.1	Vérification du décollement des barres induit par les contraintes de cisaillement longitudinales	13
4.4.2	Vérification de l'ancrage	13
4.5	Dispositions constructives	14
4.5.1	Exemples d'applications	15
4.6	Dimensionnement des renforts pour les structures béton précontraint	15
4.6.1	Critère à l'Etat Limite de Service	15
4.6.2	Ancrage	16
5.	Mise en œuvre	16
5.2	Généralités	16
5.3	Préparation du support	16
5.3.1	Cohésion superficielle du support après préparation du support	16
5.3.2	Création des engravures / rainurage du support	16
5.4	Méthodologie de mise en œuvre	16
5.5	Prescriptions de mise en œuvre barres Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC engravées	17
5.5.1	Préparation des renforts PRFC	17
5.5.2	Préparation des colles Sikadur®	17
5.5.3	Mise en œuvre des renforts à engraver Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC	17
6.	Finition et Protection des procédés Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC	18
6.1	Protection anti UV, température en service	18
6.2	Protection / contact avec l'eau	18
6.3	Protection au feu des renforts PRFC (Stabilité au feu des structures à renforcer) ou Protection contre températures élevées	18
6.4	Protection contre la corrosion	18

6.5	Protection mécanique et / ou sous étanchéité à chaud.....	18
7.	Contrôle des travaux.....	18
8.	Fourniture et assistance technique.....	19
8.1	Qualification de l'entreprise applicatrice des procédés Sika CarboDur®	19
8.2	Démarrage de chantier	19
8.3	Logiciel SIKA CARBODUR	19
9.	Résultats expérimentaux	19
10.	Données environnementales	19
11.	Références chantier.....	19
	Annexe 1 - CONTRÔLE DU RISQUE DE CONDENSATION SUR LE SUPPORT	20
	Annexe 2 – FICHES DE CONTROLE INTERNE A L'ENTREPRISE.....	22

Dossier Technique

A. Description

1. Définition de la technique objet de l'expérimentation

Le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC est un procédé pour le renforcement des structures existantes ou neuves, constituées de béton armé et/ou précontraint, par les armatures insérées dans l'enrobage du béton à proximité de la surface (NSM).

Le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC se compose d'une gamme de lamelles et de barres pultrudées fabriquées en usine, à base de fibres de carbone noyées dans une matrice de résine époxy. Les lamelles et les barres sont insérées / gravées dans le béton (technique « NSM ») et sont associées aux colles structurales Sikadur®-330, Sikadur®-300, Sikadur®-30, Sikadur®-53, Sika Anchorfix®-3030.

Le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC est essentiellement utilisé en tant que renfort d'éléments de structures travaillant en flexion ou en traction.

Le support peut être vertical, oblique, horizontal, l'application peut se faire sur toutes les faces du support.

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

Sika met à disposition des bureaux d'études structures un logiciel d'aide au calcul Sika CarboDur®, développé en interne, avec le choix entre plusieurs codes de calcul (suivant les restrictions régionales), et utilisé dans presque 100 pays à travers le monde depuis 2015. Le bureau d'études utilisateur du logiciel reste responsable de sa bonne utilisation suivant le cahier des charges fourni, de la définition des hypothèses et des données d'entrée ainsi que de l'interprétation des résultats.

2. Domaine d'emploi

Le présent document concerne, après diagnostic préalable conformément à la norme NF EN 1504, les ouvrages neufs ou anciens, en béton armé et béton précontraint.

Objectifs du renforcement :

- Accroître la résistance à la flexion (moments positifs et négatifs) et aux efforts de traction ;
- En partie supérieure d'éléments (zones tendues entre appuis, zones tendues en moments négatifs) : les poutres et dalles (sur appuis), radiers ;
- Augmentation des charges d'exploitation ;
- Ferrailage insuffisant par conception, défaut de positionnement ;
- Création d'ouvertures ;
- Endommagement de l'existant : corrosion ou sectionnement d'armatures, dommage par accident ;
- Amélioration des conditions de service : réduction de flèche de plancher, réduction des contraintes dans les armatures, réduction d'ouverture de fissures.

Les éléments concernés sont sollicités par des charges à caractère principalement statique.

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

Le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC n'est pas utilisable dans les cas suivants :

- Température de la résine et du support au niveau de collage excédant les valeurs ci-dessous :
 - 45 °C en pointe (inférieur à 24 heures) et 35 °C en continu (supérieur à 24 heures) pour les lamelles / barres gravées Sika CarboDur® S NSM / BC associées aux résines Sikadur®-30, Sikadur®-330, Sikadur®-300 ;
 - 41 °C en pointe (inférieur à 24 heures) et 32 °C en continu (supérieur à 24 heures) pour les lamelles / barres gravées Sika CarboDur® S NSM / BC associées à la résine Sikadur®-53 ;
 - 70 °C en pointe (inférieur à 24 heures) et 50 °C en continu (supérieur à 24 heures) pour les lamelles / barres gravées Sika CarboDur® S NSM / BC associées à la résine Sika Anchorfix®-3030®.

Les valeurs ci-dessus ont été définies sur la base des résultats d'essai suivant NF EN 12614.

Dans le cas accidentel, la température critique prise sera de +60°C pour le dimensionnement des protections adéquates.

- Support ruisselant.

2.1 Agressivité de l'environnement

L'utilisation pour le renforcement des éléments entrant dans la constitution des bâtiments courants et industriels, en site difficile, est admise tant que l'agressivité chimique ambiante peut être considérée comme normale. Si toutefois le système Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC doit être utilisé dans une atmosphère spécifique, il pourrait être recouvert par un revêtement complémentaire.

2.2 Zones géographiques d'utilisation

Il est possible d'utiliser le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC en France Européenne (Métropole + Corse) ainsi que dans les Départements et Régions d'Outre-Mer (DROM).

2.3 Sécurité en cas d'incendie : Réaction au feu

En l'absence de Procès-Verbal de réaction au feu, le procédé de renforcement Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC est non classé.

2.4 Résistance au feu

En ce qui concerne la résistance au feu, le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC 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.

2.5 Sécurité en cas de séisme

Les utilisations pour lesquelles l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié impose l'application des règles parasismiques ne sont pas visées dans le cadre du présent ATEX.

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

Pour la manipulation de la colle et son application, il y a lieu de respecter les prescriptions du Code du travail concernant les mesures de protection relatives à l'utilisation des produits contenant des solvants, utilisés pour le nettoyage des outils, l'utilisation de colles époxy et la manipulation des renforts carbone. En dehors de ces points, les conditions de mise en œuvre ne sont pas de nature à créer d'autre risque spécifique.

2.7 Données environnementales

Le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC ne dispose d'aucune Déclaration Environnementale (DE) et ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière.

2.8 Fabrication et contrôles

Le système de management de la Qualité de Sika France est en conformité avec la norme ISO 9001 : 2008 pour la conception, fabrication et commercialisation de l'ensemble des produits pour la construction et l'industrie. La fabrication et contrôles des lamelles, des barres NSM et des adhésives, font l'objet d'un plan d'assurance-qualité dans les usines concernées.

2.9 Prescriptions techniques

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

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

2.911 Justification à la rupture

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

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

- $(R_1) \geq 0,63 (S_2)$, dans le cas d'un élément principal, dont la rupture est susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (poutre porteuse, par exemple),
- $(R_1) \geq 0,50 (S_2)$, dans le cas d'un élément secondaire, dont la rupture n'est pas susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (panneaux de dalles de planchers posés sur poutres, par exemple).

Avec, dans ces expressions :

R_1 : capacité résistante à l'ELU, en situation fondamentale, de l'élément non renforcé.

S_2 : sollicitation agissante à l'ELU, en situation fondamentale, sur l'élément renforcé.

2.10 Conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans le dossier technique, notamment pour ce qui concerne le nettoyage et la préparation des supports ainsi que la réalisation des essais de convenances sur ce même support.

L'entreprise mettant en œuvre le procédé doit justifier d'une formation spécifique à ce type de renforcement. Le cahier de charges fourni pas le Titulaire lors de la formation des entreprises applicatrices doit intégrer l'ensemble des essais et contrôles prescrits dans le présent document.

3. Eléments et Matériaux

La gamme Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC se compose de deux types d'armature qui se différencient par leur section et leur conditionnement :

- Lamelles de section rectangulaire, Sika CarboDur® S NSM sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriquées selon le procédé de pultrusion en usine à matrice époxy, destinées à être engravées, disponibles dans différentes sections et en rouleaux de 25, 50 ou 250 mètres ;
- Barre de section circulaire, Sika CarboDur® BC sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriquées selon le procédé de pultrusion en usine à matrice époxy, destinées à être engravées, disponibles en longueur de 3 m.

Les lamelles et les barres Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC sont associées aux colles structurales Sikadur®-330, Sikadur®-300, Sikadur®-30, Sikadur®-53, Sika Anchorfix®-3030, en fonction de configurations de mise en œuvre :

- Sikadur®-330 est une résine époxy bi-composante thixotrope de consistance crémeuse pour le collage / scellement des lamelles et des barres NSM dans le béton en positions verticale, horizontale et en sous-face, disponible en kit de 5 kg ;
- Sikadur®-30 est une colle époxy bi-composante thixotrope de consistance pâte pour le collage / scellement des lamelles et des barres NSM dans le béton en positions verticale, horizontale et en sous-face, disponible en kit de 6 kg ;
- Sika Anchorfix®-3030 est une résine époxy de scellement chimique à hautes performances pour le scellement des lamelles et des barres NSM dans le béton en positions verticale, horizontale et en sous-face, disponible en cartouche bicorps de 385 ml ;
- Sikadur®-300 est une résine époxy bi-composante liquide pour le collage / scellement des lamelles et des barres NSM dans le béton en position horizontale, disponible en kit de 3,5 et 20 kg ;

- Sikadur®-53 est une résine époxy bi-composante liquide pour le collage / scellement des lamelles et des barres NSM dans le béton en position horizontale, disponible en kit de 6 kg.

3.1 Lamelles / barres à engraver Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC

Les lamelles et barres à engraver Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriqués selon le procédé de pultrusion en usine.

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

Les lamelles Sika CarboDur® S NSM sont identifiées par la désignation de la référence et le numéro de lot imprimés à intervalles réguliers sur une des faces de la lamelle (tous les 2 mètres environ).

Les barres circulaires Sika CarboDur® BC n'ont pas de marquage sur les faces des renforts. Le numéro de lot est à relever sur les bons de livraison.

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

Tableau 1 : Dimensions et propriétés des lamelles Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC

Référence	Sika CarboDur® S NSM*			Sika CarboDur® BC**		
	Section, mm ²	Largeur, mm	Épaisseur, mm	Référence	Section, mm ²	Diamètre, mm
S1.030*	30	10 ± 1,5	3 +0,1/-0,03	BC 6**	28	6 ± 0,15
S1.525	37,5	15 ± 1,5	2,5 +0,1/-0,03	BC 8**	50	8 ± 0,15
S2.025	50	20 ± 1,5	2,5 +0,1/-0,03	BC 10**	79	10 ± 0,15
				BC 12**	113	12 ± 0,15
Couleur	Noir			Noir		
Pourcentage volumétrique de fibres, %	68			65		
Densité, g/cm ³	1,6			1,6		
Température de transition vitreuse	> 100°C			> 100°C		

***tenu en stock : rouleaux 25, 50, 250 m**

****tenu en stock : barres longueur 3 m**

3.2 Colles et résines

Les résines, colles, sont des adhésives époxydiques à deux composants, thixotrope ou liquide, conditionnés en kits prédosés. Selon les conditions d'applications, les résines utilisées sont de deux consistances différentes :

- Sikadur®-300, Sikadur®-53 – les résines de consistance fluide, utilisées par coulage par gravité dans les rainures des surfaces horizontales (0 à 2% de pente). Le remplissage des rainures peut être fait avant ou après l'installation des renforts. Dans les deux cas, il est nécessaire d'assurer le maintien du niveau et le remplissage complet de l'engravure ;

- Sikadur®-330, Sikadur®-30, Sika Anchorfix®-3030 - les adhésives de consistance thixotrope, peuvent être utilisés pour toutes les surfaces et en sous faces, peuvent être extrudées avec un pistolet, via une poche, appliqué avec une spatule. Le remplissage des rainures se fait en garnissant d'abord le fond de la rainure (afin de s'assurer qu'il n'y a pas d'air inclus), jusqu'à environ la moitié de la profondeur. Pour une mise en place optimale, il faut ensuite appliquer de la colle sur les bords jusqu'en haut de la rainure.

Chaque emballage est identifié par un numéro de lot à relever sur l'étiquette lors de l'auto contrôle.

Tableau 2 : Informations techniques

Les produits bénéficient d'un marquage CE collage structural EN 1504-4, EN 1504-5, EN 1504-6.

	Références normatives	Sikadur®-30	Sikadur®-330	Sikadur®-300	Sikadur®-53	Sika Anchorfix®-3030
Agréments / Normes		Marquage CE NF EN 1504-4 : Collage ; Marquage CE NF EN 1504-3 : Réparation	Marquage CE NF EN 1504-4 : Collage	Marquage CE NF EN 1504-4 : Collage	Marquage CE NF EN 1504-5 : Injection ; Marquage CE NF EN 1504-6 : Scellement	Marquage CE : Produit d'ancrage pour scellements dans du béton fissuré / non fissuré, selon EAD 330499-00-0601, basé sur ETA 17/0694. Marquage CE : Produit d'ancrage pour scellements d'armatures de connexion, selon ETAG 001, Partie 1 et 5, édition 2013, utilisé comme EAD, basé sur ETA 17/0693.
Viscosité	ISO 3219	Pâte thixotropique	Crème, 6000 mPas à 23°C	Fluide, 700 mPas à 23°C	Fluide, 5800 mPas à 23°C	Pâte thixotropique
Temps ouvert à 20°C	EN ISO 9514	110 min	110 min	4 heures	65 min	60 min
Température de transition vitreuse	EN 12614	+52°C	+58°C	+53°C	+45°C	+51°C

Résistance en Compression (f_{Ack})	en	EN 196, 7j à +21°C	≥ 82 MPa	≥ 85 MPa	≥ 75 MPa	≥ 70 MPa	≥ 95 MPa
Résistance traction	en	NF EN ISO 527-3, 7j à +21°C	≥ 28 MPa	≥ 30 MPa	≥ 45 MPa	≥ 26 MPa	≥ 27 MPa
Module d'Elasticité Traction	en	ISO 527, 7j à +21°C	11200 MPa	4 500 MPa	3 500 MPa	4100 MPa	5500 MPa
Adhérence (f_{Atk})		EN 12188, 7j à +21°C sur acier	≈ 32 MPa	≈ 31 MPa	≈ 25 MPa	≈ 21 MPa	≈ 21 MPa
Dureté Shore D		ISO-868, 48h à 21°C	≥ 70	≥ 80	≥ 70	≥ 80	≥ 80

3.21 Températures de service

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

Dans le cas accidentel, la température critique prise sera de +60°C pour le dimensionnement des protections adéquates.

Résine	Consistance / position de renforcement	Température de transition vitreuse Tg (°C)	Température de service continu (°C)	Température de pointe (°C)
Sikadur®-30	Pâte thixotropique / toutes les surfaces et en sous faces	52	35	45
Sikadur®-330	Crème / toutes les surfaces et en sous faces	58	35	45
Sikadur®-300	Fluide / surfaces horizontales (0 à 2% de pente)	53	35	45
Sikadur®-53	Fluide / surfaces horizontales (0 à 2% de pente)	45	32	41
Sika Anchorfix®-3030	Pâte thixotropique / toutes les surfaces et en sous faces	51	50*	70*

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

3.3 Produits complémentaires

a. Sikadur®-52 injection Normal

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

b. Sikadur®-53

- Résine époxydique à deux composants sans solvant.
- Elle est utilisée pour injecter les fissures du support avant le renforcement.
- Conforme à la norme NF EN 1504-4, 5 et 6.

c. Sikadur®-41+

- Mortier époxydique à trois composants (résine, durcisseur, charges).
- Il est utilisé pour les ragréages et surfaçages localisés du support.
- Conforme à la norme NF EN 1504-3.

d. Sikadur®-30

- Pâte époxydique de ragréage bi composant.
- Permet les réparations sur de faibles épaisseurs.
- Conforme à la norme NF EN 1504-4, 3.

e. Sikadur®-31+

- Pâte époxydique de ragréage bi composant.
- Permet les réparations sur de faibles épaisseurs.
- Conforme à la norme NF EN 1504-4, 3.

f. Sika MonoTop®-4012F, -2400R, -410R

- Mortiers de réparation du béton, mono composants, applicables manuellement ou par projection voie humide.
- Monotop-4012F, - 2400R : mortiers à prise normale

- Monotop-410R : mortier à prise rapide, fibré, fin, couleur gris clair.
 - Classe R4 selon norme NF EN 1504-3.
- g. **Sika FastFix®-134 TP**
- Mortier de réparation du béton, classe R4 selon norme NF EN 1504-3, mono composant.
 - Il est utilisé pour le reprofilage de dalles, voies de circulation.
 - Recouvrement du renfort PRFC avant étanchéité à chaud (10 à 15 mm minimum).
- h. **Nettoyant Sikadur**
- Il est utilisé pour nettoyer et dégraisser des renforts avant l'encollage.
- i. **Sikafloor-400 N Elastic**
- Résine polyuréthane solvantée mono composant colorée.
 - Revêtement d'étanchéité circulaire.
 - Conforme à la norme NF EN 1504-2.
- j. **Sikafloor-264**
- Résine époxydique colorée polyvalente.
 - Protection des sols à trafics moyens.
 - Conforme à la norme NF EN 1504-2.
- k. **SikaTop-107 Protection**
- Micro-mortier à base de liant hydraulique.
 - Couleur : gris ou blanc.
 - Protection vis-à-vis des ambiances environnementales agressives.
 - Conforme à la norme NF EN 1504-2.
- l. **SikaTop-121 Surfaçage**
- Mortier de surfaçage à base de liant hydraulique modifié.
 - Couleur : gris ou blanc
 - Protection vis-à-vis des ambiances environnementales agressives.
 - Conforme à la norme NF EN 1504-2 et 3.
- m. **Sikagard-675 W ElastoColor**
- Revêtement acrylique en phase aqueuse.
 - Faible temps de recouvrement entre couches.
 - Conforme à la norme NF EN 1504-2.
- n. **Sikagard-5500**
- Revêtement acrylique élastique en phase aqueuse.
 - Souplesse pour le pontage de fissures.
 - Conforme à la norme NF EN 1504-2.
- o. **Sikagard 680 S BetonColor**
- Revêtement acrylique en phase solvant.
 - Conforme à la norme NF EN 1504-2.

4. Calcul et conception suivant le référentiel TR55 – NF EN 1992-1-1

Le dimensionnement du renforcement des structures de béton armé et de béton précontraint par les procédés Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC doit être réalisé par un Bureau d'Etudes qualifié et expérimenté en calcul de structures. Le bureau d'études peut être interne ou externe à l'entreprise applicatrice des procédés.

Le dimensionnement est basé sur le référentiel « Technical Report No 55 Design Guidance for Strengthening Concrete Structures using Fibre composite materials ». Ce guide a été écrit pour être utilisé en conjonction avec l'Eurocode 0 : Bases de calcul des structures, L'Eurocode 1 : Actions sur les structures et l'Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.

Les hypothèses fondamentales de calcul du béton armé sont retenues :

- Les sections planes restent planes après déformations,
- Il n'y a pas de glissement relatif entre les armatures internes en acier, les renforts PRFC et le béton,
- La résistance en traction du béton est négligée,

- La résistance en compression des renforts PRFC est négligée,
- Les matériaux de renforcement ont un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture.

4.1 Notations

Béton		Composite	
b	Largeur de l'élément béton	A_f	Section du renfort carbone
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton en compression	b_f	Largeur du composite
f_{cd}	Résistance de calcul du béton en compression	f_{fk}	Résistance caractéristique du composite en traction
f_{ctk}	Résistance caractéristique du béton en traction	f_{fd}	Résistance de calcul du composite en traction
ε_c	Déformation du béton	E_f	Module d'élasticité du composite (valeur moyenne)
ε_{c2}	Déformation du béton atteinte pour la contrainte de compression maximale	E_{fk}	Module d'élasticité caractéristique du composite
ε_{cu2}	Déformation ultime du béton en compression	E_{fd}	Module d'élasticité de calcul du composite
σ_c	Contrainte de compression du béton	ε_{fk}	Déformation caractéristique du composite en traction
α_{cc}	Coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance en compression et des effets défavorables résultant de la manière dont la charge est appliquée	ε_{fd}	Déformation de calcul du composite en traction
γ_c	Coefficient partiel de sécurité du béton	ε_{mt}	Déformation maximale du composite dans la zone élastique
M_{Rd}	Moment résistant du béton	ε_{fmax}	Déformation du composite au moment ultime de calcul
M_{Ed}	Moment ultime de calcul	$\gamma_{FRP,E}$	Coefficient partiel de sécurité sur le module d'élasticité du composite à l'ELU
M_y	Moment de la section renforcée pour lequel les armatures atteignent leur limite élastique	$\gamma_{FRP,m}$	Coefficient partiel de sécurité additionnel pour les composites résultants d'un processus de fabrication
Acier		$\gamma_{FRP,\varepsilon}$	Coefficient partiel de sécurité sur la déformation du composite à l'ELU
		M_{add}	Moment repris par le composite
A_s	Section d'armatures	σ_{fmax}	Contrainte dans le composite au moment ultime de calcul
f_{yk}	Résistance caractéristique des armatures en traction	σ_{fy}	Contrainte dans le composite pour lequel les armatures atteignent leur limite élastique
f_{yd}	Résistance de calcul des armatures	t_f	Épaisseur du composite
d	Distance entre les aciers de traction et la fibre supérieure du béton	$b_{notchperim}$	Périmètre effectif de l'engravure
ε_s	Déformation des armatures	$b_{barperim}$	Périmètre du composite NSM
σ_s	Contrainte de traction des armatures	f_{at}	Résistance caractéristique de l'adhésif structural
E_s	Module d'élasticité des armatures (200 000 MPa)	l_{nsm}	Longueur d'ancrage calculée
γ_s	Coefficient partiel de sécurité de l'acier	$l_{nsm,max}$	Longueur d'ancrage maximale
z	Bras de levier	n_{nsm}	Nombre de barres engravées mises en place
		T_d	Effort exercé par le composite engravé
		T_{nsm}	Effort d'ancrage caractéristique du composite engravé
		$T_{nsm,max}$	Effort d'ancrage maximal du composite engravé
		$T_{nsm,ad}$	Effort caractéristique de décollement à rupture de l'adhésif
		$T_{nsm,lim}$	Limite maximale de la force d'ancrage
		τ_{ad}	Contrainte de cisaillement à l'interface adhésive-NSM
		$\tau_{ad,lim}$	Contrainte de cisaillement limite à l'interface adhésive-NSM
		τ_{conc}	Contrainte de cisaillement longitudinale à l'interface adhésive-béton
		$\tau_{lim,c}$	Contrainte limite de cisaillement du béton
		$\Delta\sigma_f$	Variation de contrainte dans le composite NSM
		Δy	Petite distance entre deux sections consécutives le long de l'élément
		γ_A	Coefficient partiel de sécurité pour l'adhésif structural

4.2 Lois de comportement des matériaux

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

4.21 Loi de comportement du béton

Les valeurs de calcul dans la section de béton sont déterminées à partir du diagramme parabole-rectangle des contraintes en fonction de la déformation :

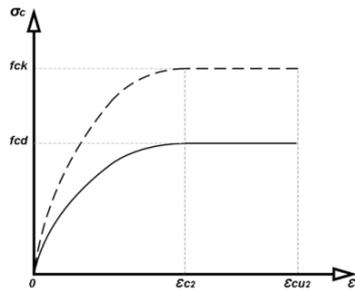


Figure 1 : Loi de comportement du béton

La valeur de la résistance du béton en compression de calcul est donnée par la formule :

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad [1]$$

- $\alpha_{cc} = 1$ Valeur utilisée pour l'Annexe Nationale française (valeur recommandée pour les bâtiments). Le coefficient α_{cc} tient compte de l'effet défavorable de la durée d'application des charges.
- $\gamma_c = 1,2$ Pour les situations accidentelles.
- $\gamma_c = 1,5$ Dans les autres cas.

4.22 Loi de comportement de l'acier

Les valeurs de calcul des armatures de béton armé sont issues du diagramme bilinéaire simplifié :

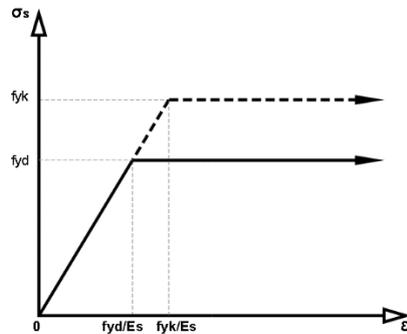


Figure 2 : Loi de comportement de l'acier

La valeur de la résistance à la traction de l'acier de calcul est donnée par la formule :

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad [2]$$

- $\gamma_s = 1$ Dans les situations accidentelles.
- $\gamma_s = 1,15$ Dans les autres cas.

4.23 Loi de comportement et caractéristiques des renforts Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC

Le TR55 tient compte d'une combinaison de coefficients partiels de sécurité qui s'appliquent sur les valeurs caractéristiques des composites afin de déterminer les valeurs de calcul.

Les valeurs des coefficients partiels de sécurité vis-à-vis de la méthode de fabrication et type des renforts (lamelles et barres pultrudées) sont données dans le tableau suivant :

Coefficients partiels de sécurité sur Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC selon le TR 55

Coefficients partiels de sécurité	
Coefficient partiel de sécurité sur le module d'élasticité du composite, $\gamma_{FRP,E}$	1,1
Coefficient partiel de sécurité additionnel relatif au processus de fabrication du composite, $\gamma_{FRP,m}$	1,05
Coefficient partiel de sécurité sur la déformation du composite, $\gamma_{FRP,\epsilon}$	1,25

En appliquant les coefficients partiels de sécurité appropriés, les valeurs de calcul pour le composite : E_{fd} ; ϵ_{fd} ; f_{fd} sont déterminées de la façon suivante :

- $E_{fd} = \frac{E_{fk}}{\gamma_{FRP,E} \cdot \gamma_{FRP,m}}$, module d'élasticité de calcul du composite, où E_{fk} - module d'élasticité caractéristique du composite ;
- $\epsilon_{fd} = \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_{FRP,E} \cdot \gamma_{FRP,m}}$, déformation de calcul du composite, où ϵ_{fk} - allongement à rupture caractéristique du composite ;

Etat Limite Ultime : Contrainte limite de traction pour un calcul à l'ELU (la résistance de calcul du composite) :

$$f_{fd} = E_{fd} \cdot \varepsilon_{fd} \quad [3]$$

Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques pour le dimensionnement des renforts Sika CarboDur® S NSM / BC

			Sika CarboDur® S 1.030	Sika CarboDur® S 1.525	Sika CarboDur® S 2.025	Sika CarboDur® BC 6	Sika CarboDur® BC 8	Sika CarboDur® BC 10	Sika CarboDur® BC 12
Module d'élasticité moyen (valeur moyenne)	E_f	[GPa]	170	170	170	175	153	150	150
Module d'élasticité caractéristique (fractile 5%)	E_{fk}	[GPa]	165	165	165	170	150	140	140
Module d'élasticité de calcul	E_{fd}	[GPa]	142,9	142,9	142,9	147,2	129,9	121,2	121,2
Allongement à rupture moyen (valeur moyenne)	ε_f	[%]	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5
Allongement à rupture caractéristique (fractile 5%)	ε_{fk}	[%]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,4	1,3	1,3
Allongement à rupture de calcul	ε_{fd}	[%]	1,22	1,22	1,22	1,22	1,07	1	1
Résistance moyenne en traction (valeur moyenne)	f_f	[MPa]	3100	3100	3100	3100	2500	2300	2300
Résistance caractéristique en traction (fractile 5%)	f_{fk}	[MPa]	2900	2900	2900	3000	2200	1900	1900
Résistance de calcul	f_{fd}	[MPa]	1741,5	1741,5	1741,5	1794,3	1385,3	1200,6	1200,6
Section du renfort carbone	A_f	[mm ²]	30	37,5	50	28	50	79	113

4.3 Règles pour le dimensionnement du renforcement de structures en béton armé suivant le référentiel TR55 – NF EN 1992-1-1

4.31 Introduction

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

4.32 Dimensionnement à l'ELU

4.321 Justification à la rupture

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

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

- $(R_1) \geq 0,63 (S_2)$, dans le cas d'un élément principal, dont la rupture est susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (poutre porteuse, par exemple),
- $(R_1) \geq 0,50 (S_2)$, dans le cas d'un élément secondaire, dont la rupture n'est pas susceptible d'entraîner celle d'autres éléments (panneaux de dalles de planchers posés sur poutres, par exemple).

Avec, dans ces expressions :

R_1 : capacité résistante à l'ELU, en situation fondamentale, de l'élément non renforcé.

S_2 : sollicitation agissante à l'ELU, en situation fondamentale, sur l'élément renforcé.

4.322 Vérification préalable de la structure

Avant renforcement, c'est-à-dire en tenant compte uniquement des aciers existants et non des renforts Sika® CarboDur®, la structure doit reprendre la totalité des charges prévues (charges initiales et charges nouvelles) à l'E.L.U. sous différentes combinaisons accidentelles en fonction de la catégorie de bâtiment.

4.323 Calcul préliminaire

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

$$A_f = \frac{M_{add}}{\varepsilon_{fe} E_{fd} z} \quad [4]$$

Avec :

- M_{add} : moment sollicitant additionnel ($M_{Ed} - M_{Rd}$)
- ε_{fe} : déformation de calcul du composite = $\min \left\{ \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{FRP,m\epsilon}}; 0,8\% \right\}$.
- E_{fd} : module d'élasticité de calcul du composite.
- z : bras de levier des armatures tendues

4.324 Calcul du moment résistant de la section renforcée

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

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

$$\varepsilon_s \geq 0,002 + \frac{f_{yk}}{E_s \gamma_s} \quad [5]$$

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

4.33 Méthodologie de calcul (ELU)

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

- a) Calculer les déformations initiales dans la structure à l'état initial, c'est-à-dire au moment des travaux de renforcement.
- b) Calculer les charges appliquées à la structure à l'ELU et déterminer le moment sollicitant M_{Ed} .
- c) Estimer la section de renfort carbone nécessaire (voir §4.323).
- d) Supposer une valeur initiale pour la déformation maximale dans le béton ($\leq \varepsilon_{cu2}$ ou ε_{cu3} suivant le diagramme contrainte-déformation utilisé selon l'Eurocode 2).
- e) Supposer une position initiale pour l'axe neutre.
- f) En tenant compte des recommandations initiales, calculer les forces dans la section à renforcer. Le calcul est basé sur un profil de déformation linéaire dans lequel la déformation dans le composite tient compte de la déformation initiale dans le béton.
- g) Itérativement, ajuster la position de l'axe neutre jusqu'à l'équilibre des forces dans la section.
- h) Vérifier les contraintes et les déformations par rapport aux critères suivants :
 - a. La déformation maximale dans le béton ne doit pas dépasser ε_{cu2} ou ε_{cu3} suivant le diagramme contrainte-déformation utilisé selon l'Eurocode 2.
 - b. La contrainte de cisaillement longitudinale τ_t dans le composite ne doit pas dépasser la contrainte de cisaillement limite $\tau_{lim,y}$.
 - c. La déformation dans le composite ε_{mt} doit être inférieure à sa déformation de calcul ε_{fd} .

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

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

4.34 Vérifications à l'ELS

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

Pour le béton :

$$\begin{aligned} \sigma_s &\leq \sigma_{c,lim} = 0,6 f_{ck}, \text{ sous combinaison caractéristique} \\ \sigma_s &\leq \sigma_{c,lim} = 0,45 f_{ck}, \text{ sous combinaison quasi permanente} \end{aligned}$$

Pour les armatures tendues :

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

Pour les renforts PRFC :

$$\sigma_f \leq \sigma_{f,lim} = \min[0,9\sigma_{s,lim}; 0,65 f_{fd}], \text{ sous combinaison caractéristique } (f_{fd} - \text{la résistance ultime du composite, voir [3]})$$

4.4 Vérifications particulières Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC

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

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

4.411 Rupture à l'interface adhésif / béton

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

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

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

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

Où :

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

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

$$\tau_{lim,c} = \min \left[0,8 \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}; 2 \text{ MPa} \right]$$

Où :

- $f_{ctk0,05}$ Résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5%.
- $\gamma_c = 1,2$ coefficient partiel relatif au béton, pour les situations accidentelles.
- $\gamma_c = 1,5$ coefficient partiel relatif au béton, dans les autres cas.

4.412 Rupture à l'interface barre engravée / adhésif

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

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

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

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

Où :

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

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

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

Où :

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

4.42 Vérification de l'ancrage

4.421 Rupture dans le béton

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

$$T_{nsm,max} = 10 b_{notchperim} \sqrt{E_{fd} A_f f_{ctk,0,05}}$$

$$l_{nsm,max} = 0.135 b_{notchperim} \sqrt{\frac{E_{fd} A_f}{f_{ctk,0,05}}}$$

Où :

- $b_{notchperim}$: périmètre effectif de rainure, calculé comme étant 1x largeur minimale plus 1x profondeur minimale ;
- E_{fd} : module d'élasticité de calcul de composite NSM exprimé en GPa.
- A_f : section de composite NSM.
- $f_{ctk,0,05}$: Résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5%.

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

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

4.422 Rupture dans l'adhésif

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

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

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

4.423 Rupture dans la zone d'enrobage du béton

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

$$T_{nsm,lim} = 38 \sqrt{\frac{b}{n_{nsm}} (E_{fd} A_f f_{ctk,0,05})} \leq A_f f_{fd} = T_{ul}$$

Où/

- n_{nsm} est le nombre de barres engravées mises en place ;
- E_{fd} est le module d'élasticité de calcul de composite NSM exprimé en GPa ;
- b est la largeur de la section à renforcer. Dans le cas de renforcement d'une dalle, le rapport $\frac{b}{n_{nsm}}$ correspond à l'espacement axe à axe entre les renforts ;
- $f_{ctk,0,05}$: résistance caractéristique en traction directe du béton, fractile 5% ;
- A_f : section de composite NSM ;
- f_{fd} : résistance de calcul de composite NSM ;
- T_{ul} : effort ultime reprise par composite NSM.

4.5 Dispositions constructives

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

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

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

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

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

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

Entraxe s_f min [mm]

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

- $s_f = \max[3 \varnothing_s; d_k]$, où \varnothing_s - est le diamètre de la barre circulaire à engraver Sika Carbodur® BC en mm ; d_k - diamètre du plus gros grain du béton en mm

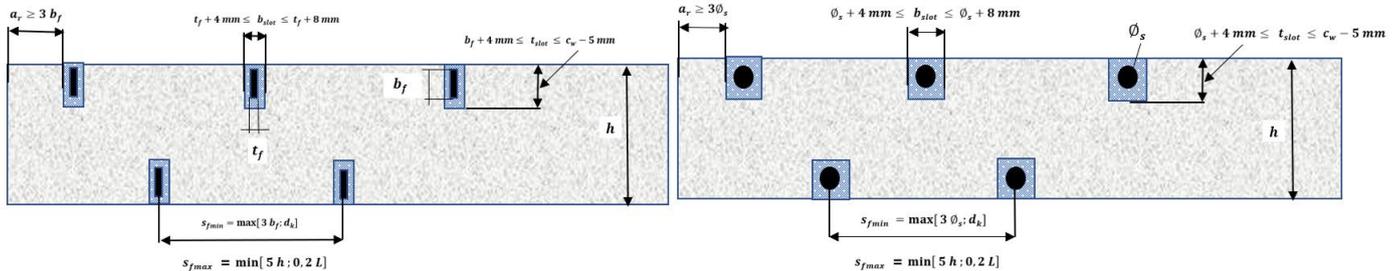
La distance entre l'axe de renfort à engraver et bord libre de l'élément a_r [mm] :

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

Entraxe maximale s_{fmax} [mm] = $\min[5 h; 0,2 L]$, où h - est l'épaisseur de la dalle et où L - la portée de l'élément à renforcer

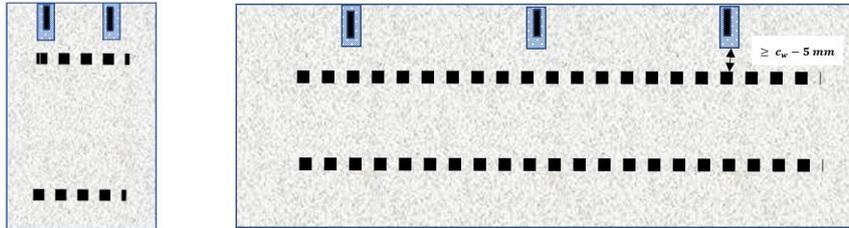
Entraxe en porte-à-faux s_{fmax} [mm] = $0,4 L$, où L - la portée de l'élément à renforcer

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



4.51 Exemples d'applications

Renforcement NSM d'une poutre ou d'une dalle



4.6 Dimensionnement des renforts pour les structures béton précontraint

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

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

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

4.61 Critère à l'Etat Limite de Service

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

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

Avec :

$\sigma_{conc,t,b}$: contraintes maximales dans le béton (traction ou compression) à la fibre la plus tendue ou la plus comprimée.

$P_{m,t}$: force de précontrainte au moment des travaux de renforcement.

A_c : aire de la section béton.

e : excentricité des tendons précontraints par rapport au centre de gravité de la section.

$y_{t,b}$: distance du centre de gravité de la section à la fibre la plus tendue ou la plus comprimée.

I_c : inertie de la section béton.

$M_{existing}$: moment dans la section au moment des travaux de renforcement.

$M_{add,service}$: moment additionnel après renforcement (ELS).

$y_{trans,t,b}$: distance du centre de gravité de la section renforcée à la fibre la plus tendue ou plus comprimée.

I_{trans} : inertie de la section renforcée.

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

Pour le béton :

$$\begin{aligned} \sigma_s &\leq \sigma_{c,lim} = 0,6 f_{ck}, \text{ sous combinaison caractéristique} \\ \sigma_s &\leq \sigma_{c,lim} = 0,45 f_{ck}, \text{ sous combinaison quasi permanente} \end{aligned}$$

Pour les armatures BA tendues :

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

Pour les armatures de précontrainte :

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

Pour les renforts PRFC :

$$\sigma_f \leq \sigma_{f,lim} = \min[0,9\sigma_{s,lim}; 0,65 f_{fd}], \text{ sous combinaison caractéristique } (f_{fd} - \text{la résistance ultime du composite, voir [3]})$$

Augmenter la section du matériau composite si nécessaire.

4.62 Ancrage

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

5. Mise en œuvre

5.2 Généralités

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

Il s'agit de déterminer notamment l'état du béton (résistance interne et cohésion superficielle, carbonatation, présence de chlorures, ...), l'état des armatures (section et positionnement, état de corrosion).

5.3 Préparation du support

La préparation mécanique du support a pour objet :

- D'éliminer toute trace d'huile, de graisse, de laitance, de revêtements ou imprégnations existants, de produit de décoffrage, etc. ;
- De mettre en évidence d'éventuelles zones fissurées et/ou ségrégées, des cavités ou des armatures apparentes corrodées.

Le diagnostic permet de déterminer s'il faut éliminer les parties du support contaminées par la pénétration de chlorures, sulfates.

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

5.31 Cohésion superficielle du support après préparation du support

Après préparation, la cohésion du support béton doit être mesurée en se basant sur la norme NF EN 1542 (essai in-situ de traction directe sur pastilles métalliques collées au support – appareil dynamomètre de traction type Sattec).

La valeur moyenne est obtenue à partir d'au moins 5 valeurs individuelles par zone testée. Les valeurs individuelles écartées de $\pm 20\%$ de cette valeur moyenne sont exclues. La cohésion moyenne se calcule sur les valeurs conservées avec un minimum de 3 valeurs.

La valeur obtenue sert à caractériser le support avant la mise en œuvre des renforts PRFC mais aussi à valider les hypothèses prises lors du dimensionnement des renforts.

5.32 Création des engravures / rainurage du support

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

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

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

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

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

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

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

En cas d'utilisation des adhésifs : Sikadur®-330, Sikadur®-300, Sikadur®-30, Sikadur®-53, l'humidité interne du béton doit être inférieure à 4%. Il ne doit pas y avoir d'arrivée d'eau dans la rainure lors de la mise en œuvre de la colle.

Vérifier avant l'opération de collage qu'il n'y a pas de risque de condensation sur le support (Consulter la Notice Produit de la colle sélectionnée).

5.4 Méthodologie de mise en œuvre

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

- Le procédé à utiliser ;
- Le type de renfort ;
- La section des renforts : largeur, épaisseur ;
- Le positionnement des renforts sur la structure et leur longueur ;
- L'espacement entre renforts ;
- La distance entre les renforts et les bords des éléments de structure

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

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

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

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

5.5 Prescriptions de mise en œuvre barres Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC engravées

5.5.1 Préparation des renforts PRFC

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

5.5.2 Préparation des colles Sikadur®

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

Sika® AnchorFix®-3030 : consulter la notice Produit pour la préparation et l'application de la résine dans la rainure.

Tableau 4 : Consommation usuelle de résine par 1mL de renfort à engraver (variable suivant état du support) - g/mL*

Résine	Sika CarboDur® S 1.030	Sika CarboDur® S 1.525	Sika CarboDur® S 2.025	Sika CarboDur® BC 6	Sika CarboDur® BC 8	Sika CarboDur® BC 10	Sika CarboDur® BC 12
Engravure [$b_{slot} \times t_{slot}$]	7 x 14	7 x 19	7 x 24	10 x 10	12 x 12	14 x 14	16 x 16
Sikadur®-30	118	155	194	236	112	158	195
Sikadur®-300	83	109	136	166	79	111	137
Sikadur®-330	93	122	153	186	88	124	153
Sikadur®-53	146	191	240	292	139	195	241
Sika Anchorfix®-3030	108	141	176	214	102	143	177

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

5.5.3 Mise en œuvre des renforts à engraver Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC

5.5.3.1 Dispositions générales

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

Les colles fluides, telles que Sikadur®-300 et Sikadur®-53 sont utilisées pour les surfaces horizontales (0 à 2% de pente). La consistance « coulis » permet une mise en œuvre facile et rapide par simple coulage gravitaire dans la rainure. Assurer le remplissage des engravures à refus par gravité ou par extrusion de la colle. Durant la DPU de la colle, les barres sont insérées et maintenues dans les rainures. Il convient de presser légèrement la barre afin de permettre à la colle de refluer de manière continue autour de la barre.

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

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

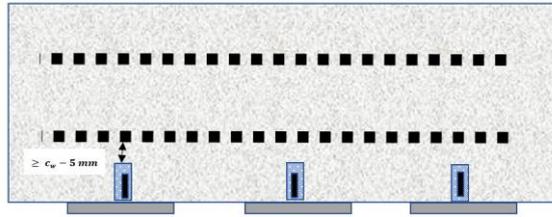
Pour éliminer les éventuelles bulles d'air et effectuer la finition, la surface doit être lissée à l'aide d'une truelle, lisseuse ou pinceau.

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

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

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

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



Renforcement NSM en sous face

5.532 Finition en vue de la mise en œuvre d'un revêtement d'étanchéité :

Pour les éléments extérieurs à renforcer (tels que les balcons, les toitures terrasses ou les gradins de stade), les éléments porteurs et supports en béton restent conformes aux NF DTU 20.12 et 43.1. Le système de renforcement par barres engravées peut être recouvert par les systèmes d'étanchéité liquides à froid de type polyuréthane (par ex : Sikafloor 400 N Elastic (F), Sika Premium ou SikaRoof MTC), époxydique et PMMA après saupoudrage de sable à refus de la surface de résine de scellement. Le système de renforcement peut être également recouvert par des systèmes d'étanchéité projetés à chaud après protection mécanique / thermique de la résine de scellement.

6. Finition et Protection des procédés Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC

Une fois la mise en œuvre terminée, le procédé Sika CarboDur® S NSM / Sika CarboDur® BC peut être recouvert pour des raisons esthétiques (aspect type béton, finition colorée) ou techniques (abrasion hydraulique, choc, trafic, ...). Il convient alors de choisir parmi les possibilités décrites ci-dessous. La protection au feu est un cas particulier (voir §6.3).

6.1 Protection anti UV, température en service

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

Les valeurs de température d'exploitation de l'ouvrage en service continu sont données dans § 3.21. Au-delà de ces valeurs, il pourrait être nécessaire protéger le renforcement.

6.2 Protection / contact avec l'eau

Pour les cas où les renforts sont mis en œuvre dans des situations telles que le contact sera régulier ou permanent avec l'eau (cas des bassins, réservoirs, cuves, station d'épuration, autres ouvrages hydrauliques), il est nécessaire d'assurer la durabilité du renforcement de l'ouvrage en réalisant une protection avec un système Sikagard-63 N ou un système d'imperméabilisation par revêtement mince (Sikatop-121, ou -107) ou équivalent.

6.3 Protection au feu des renforts PRFC (Stabilité au feu des structures à renforcer) ou Protection contre températures élevées

La structure à renforcer doit être justifiée selon la norme P 92-701 (Comportement au feu des structures en béton – Règles de calcul FEU-BETON) ou la norme EN 1992-1-2 et son Annexe Nationale (Comportement au feu) en faisant un calcul à l'E.L.U. en considérant les charges sans coefficient de pondération (combinaisons accidentelles) et en prenant en compte uniquement les armatures acier de béton armé existants : alors aucune protection au feu des procédés Sika CarboDur® n'est nécessaire.

Dans le cas contraire, il faut prévoir une protection des renforts PRFC vis-à-vis de l'élévation de température. Cette protection sera justifiée, afin que la température selon la durée d'exposition spécifiée, ne dépasse pas +60°C dans le plan du collage.

Il est possible d'utiliser un système de protection thermique dont l'épaisseur est définie sur la base d'essais au feu faisant l'objet de PV d'un laboratoire agréé (plaques préfabriquées en silico-calcaire, système isolant thermique pâteux, mortier spécial, ...) sur un support similaire.

6.4 Protection contre la corrosion

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

6.5 Protection mécanique et / ou sous étanchéité à chaud

La protection mécanique des renforts engravés n'est pas obligatoire car ils sont protégés par leur mise en œuvre (noyés dans la résine époxydique).

Lorsqu'une protection des renforts engravés est demandée (avant mise en œuvre d'une étanchéité projetée à chaud, par exemple), il est possible d'utiliser Sika FastFix®-134 TP comme suit :

- Saupoudrage de la résine Sikadur®, à l'état frais, de sable de quartz propre et sec de granulométrie 0,7/1,3 mm.
- Le lendemain, aspiration des particules non adhérentes et mise en œuvre du mortier de protection Sika FastFix®-134 TP sur une épaisseur minimum de 15 mm.

Respecter les délais de durcissement spécifiés dans la Notice Produit du mortier de protection appliqué avant la remise en service ou mise en œuvre de l'étanchéité projetée à chaud.

7. Contrôle des travaux

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

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

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

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

A- Contrôles avant la mise en œuvre

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

B- Contrôle lors la mise en œuvre

- Bon état des produits juste avant la réalisation du mélange,
- Homogénéité du mélange des produits (couleur et consistance),
- Suivi de la procédure d'application (voir exemple de fiches d'autocontrôle en annexe).

Pour les barres engravées :

- Découpe et préparation des renforts, nettoyage avec Nettoyant Sikadur,
- S'assurer que les barres sont totalement enrobées, recouvertes par la résine et qu'elles restent bien positionnées à la profondeur souhaitée sans remonter à la surface de la rainure.

En complément et si cela est prévu dans le cadre du marché :

- Vérification de la résistance des colles durcies par mesurage de la dureté shore D sur échantillons prélevés, à l'aide d'un duromètre.

8. Fourniture et assistance technique

8.1 Qualification de l'entreprise applicatrice des procédés Sika CarboDur®

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

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

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

8.2 Démarrage de chantier

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

8.3 Logiciel SIKA CARBODUR

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

9. Résultats expérimentaux

Procédé SIKA CARBODUR :

- LMC2 – Caractérisation des barres Sika CarboDur BC – Traction uniaxiale et pull-out modifié.
- LMC2 – Caractérisation des barres Sika CarboDur S, type NSM – Traction uniaxiale et pull-out modifié.
- LMC2 – Sikadur®-53: Evaluation de Tg.
- Rapport d'essais : efforts repris par des barres d'armatures de connexion en fonction de la profondeur d'ancrage et de la durée d'exposition au feu, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), REPORT No MRF 26072904/C.
- Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP, Ernst-Lucas Klamer, Thèse Technische Universiteit Eindhoven, 2009.
- Sika AnchorFix®-3030, European Technical Assessment ETA 17/0694 of 25/10/2021.

10. Données environnementales

Le procédé de renforcement par collage des matériaux composites Sika CarboDur® ne fait pas l'objet d'une Déclaration Environnementale (DE). Il ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière. Les données issues des DE ont notamment pour objet de servir au calcul des impacts environnementaux des ouvrages dans lesquels les procédés visés sont susceptibles d'être intégrés.

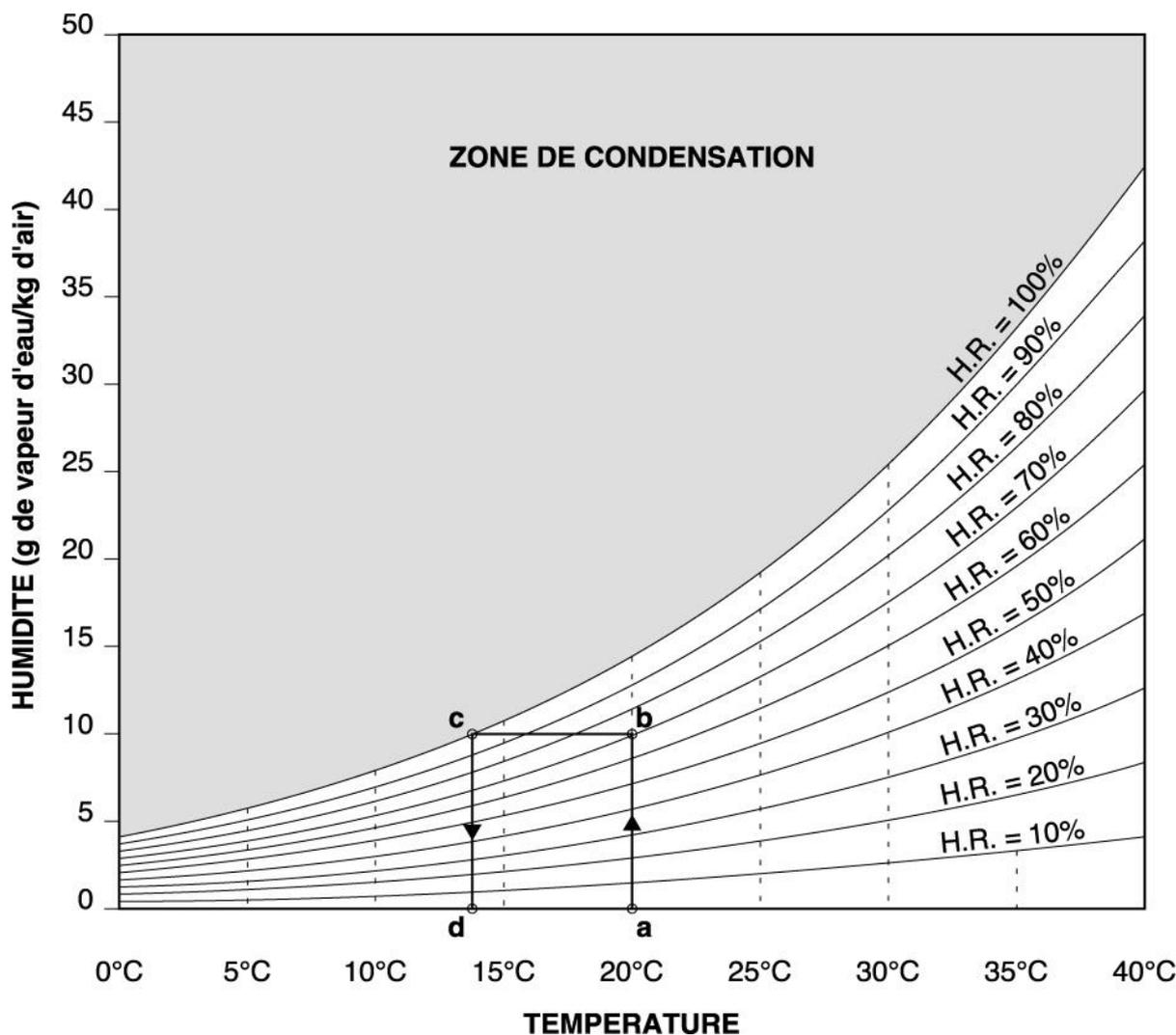
11. Références chantier

Liste non exhaustive de références :

- 2018 – Nantes (44) – Bâtiment ERP (Lycée) – Renfort en chapeaux : Sika CarboDur® BC 10, 12, Sikadur®-53
- 2018 – Monte-Carlo – Parking résidence – Renforcement radier : Sika CarboDur® BC 6, Sikadur®-53, SikaFloor-264
- 2018 – Blaye (33) – Pole emploi – Couturage des fissures façade béton : Sika CarboDur®-BC 12, Sikadur®-30
- 2022 – Marseille – AEROGARE MARGNANE – Renforcement plancher nappe supérieure

Annexe 1 - CONTRÔLE DU RISQUE DE CONDENSATION SUR LE SUPPORT

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



Ce diagramme permet de contrôler le risque de condensation sur les supports.

Il faut connaître trois paramètres :

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

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

- Pointer la température ambiante (point a),
- Prendre la verticale jusqu'à couper la courbe correspondante à l'humidité relative (point b),
- Suivre l'horizontale jusqu'à couper la courbe humidité relative égale 100 % (point c),
- Lire la température à la verticale de ce dernier point (point d).

Cette température est celle du support en dessous de laquelle il y a condensation.

La température du support doit donc être supérieure à cette dernière valeur augmentée de 3 degrés.

Exemple : pour une température ambiante de 20°C et une humidité relative HR de 70 %, la température du support doit être supérieure à 17°C (soit 14°C + 3°C).

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

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

Tableau des points de rosée :

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

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

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

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

Annexe 2 – FICHES DE CONTROLE INTERNE A L'ENTREPRISE

Fiche N° 1 - contrôles du support préalables à la mise en œuvre des barres PRFC engravées		
Entreprise : Date : Référence chantier : Type de structure à renforcer (poutre, dalle) : Nature du support : Localisation de l'application (référence, plan, étage, ...) : Nom de la personne chargée du contrôle interne :		
Eléments à contrôler	conforme Oui / Non	Actions correctives
Diagnostic de la structure disponible Support contaminé par chlorures, sulfates, autres agents...		Demande au maitre d'œuvre si besoin
Préparation du support Absence de revêtement existant et imprégnation (peinture, revêtements, flocage, plâtre, hydrofuges de surface, ...)		Elimination des revêtements : décapage par sablage, lavage eau haute pression, ponçage, ...
Absence de laitance, huile, graisse, lichens, mousses,		Elimination de la laitance et des impuretés : sablage, lavage eau haute pression, ponçage,
Absence de fissure inerte de largeur > 0,3 mm		Réparation, rebouchage ou injection selon NF P 95103
Absence d'éclats de béton avec ou sans armatures apparentes, de zones ségréguées (nids de cailloux)		Réparation suivant DTU 42.1, NF P 95101
Absence de défauts de surface : bullage, cavités		Réparation, surfaçage DTU 42.1, NF P 95101
Dimensions des rainures (largeur, profondeur, rectitude sur la longueur) conformes à l'Avis Technique		Ajuster les dimensions au trait de scie, burin, disquieuse, jusqu'à conformité avec §4.5
Planéité du fond de rainure : Pourcentage de pente		Ponçage, réparation Ponçage, réparation
Cohésion de support et des éventuelles réparations existantes : Mesurage de la cohésion superficielle du béton par traction directe (essai de pastillage avec appareil sattec) après préparation, selon NF EN 1542 Note : le nombre de pastilles, la(les) zone(s) à tester sont à définir avec le maître d'œuvre		Rendre compte au maitre d'œuvre/contrôleur technique pour arbitrage : - décapage puis reconstitution du béton de surface (NF P 95101, DTU 42.1)
Plan de pose des renforts disponible avec type de renforts PRFC, espacement entre renforts, longueur des renforts, dimensions des engravures, distances aux bords, etc...		Obtenir document auprès du bureau d'études d'exécution
Liste du Matériel et EPI disponibles pour tout le personnel		Obtenir information auprès de l'encadrement de chantier
Conditions de stockage et de conservation des produits conformément aux Notices produits (à l'abri du soleil, de la pluie, température 10 à 20 °C recommandée)		Mise en stockage conforme

Fiche N° 2 - contrôles lors de la mise en œuvre des barres engravées Sika CarboDur

Entreprise : Date :

Référence chantier :

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

Nature du support :

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

.....

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

N° de lot des produits (colle Sikadur-53,-330,-30,-300).....

Nom de la personne chargée du contrôle interne :

Éléments à contrôler	conforme Oui / Non	Actions correctives
Absence de pluie, de gel, de poussière, sur l'élément à renforcer et la zone de travail		Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures de protection de la zone de travail pour être à l'abri.
Vérification des conditions de température : Support / ambiance/ produits Température : +8°C / +35°C (idéal : ≈ 20°C)		Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures (réchauffement ou refroidissement) pour être à l'abri. Stocker les produits dans un local à température contrôlée
Contrôle du risque de condensation (voir méthode en annexe 1) Mesurage de la température ambiante, du taux d'humidité relative, de la température de surface du support Temp. de surface du support > Temp. point rosée + 3°C		Voir §Erreur ! Source du renvoi introuvable. Conditions générales d'application. • Attente des conditions favorables ou mise en œuvre de mesures : réchauffer le support et l'air ambiant et/ou abaisser l'humidité de l'air (déshumidifier).
Liste du Matériel et EPI disponibles pour tout le personnel		Obtenir information auprès de l'encadrement de chantier
Préparation de la rainure -		
Préparation de la barre Sika CarboDur® - référence de la barre (exemple Sika CarboDur® BC6) à appliquer : en accord avec le plan de pose - longueur de barre à découper suivant plan de pose - barre en bon état pour le collage : absence de défaut sur la barre (cassure, fissure, ...) - Barre propre : absence de poussière, de résidu gras, ...		Remplacement de la barre, référence conforme au plan ou à la note de calcul Dégraisser et nettoyer avec Nettoyant Sikadur
Préparation des colles Mélange des composants de la colle Sikadur pendant au moins 3 mn jusqu'à obtenir la consistance homogène, la couleur uniforme		Poursuivre le malaxage à vitesse ≤ 300 tr/mn avec l'hélice Sikadur adaptée
Pose de la barre - Repérage du positionnement : conforme au plan de pose - Mise en place de plots de scellement chimique dans le fond de la rainure - Positionnement de la barre sur les plots de scellement - Mise en œuvre de la résine dans la rainure - Elimination du reflux de colle sur les bords avant durcissement Distance entre barres : suivant plan de pose		Voir plan de pose
		S'assurer de la planéité du fond de la rainure
		Ajuster la position de la barre dans la rainure
		Ajouter de la résine jusqu'à ce que la barre soit noyée et la rainure remplie
		Eliminer le reflux de colle
Contrôle si prévu dans le cadre du marché : - vérification de la résistance de la colle durcie par mesurage de la dureté shore D sur échantillons prélevés, à l'aide d'un duromètre.		Vérifications du matériel de mélange, hélice de malaxage Sika, vitesse de malaxage, conditions de température et délai avant mesure des duretés.