

Performance au feu du CFRC

Données d'essais, propriétés dépendantes de la température et recommandations de conception

Les fibres de carbone présentent une résistance intrinsèque élevée à la chaleur, tandis que la matrice cimentaire apporte une isolation thermique. Cette combinaison permet d'envisager des classements au feu optimistes pour des éléments correctement conçus, souvent comparables, voire supérieurs, à ceux du béton armé traditionnel dans des sections minces.

La réalité : toute imprégnation polymère (p. ex. revêtements vinylester/époxy) ou tout renforcement collé en surface introduit des vulnérabilités au-delà d'environ 100-240°C, du fait de la dégradation des résines. Les systèmes incorporés (armatures/treillis noyés) se comportent nettement mieux que les renforcements externes non protégés. Les données proviennent de la littérature et des normes (série ACI 440, études expérimentales) ; les recherches documentaires spécifiques ont été limitées, mais ACI 440.1R-15 signale une résistance au feu généralement plus faible des FRP que l'acier sans ajustements, tandis que des essais modernes sur béton carbone montrent des résultats solides.

1. Données d'essais de résistance au feu:

Les essais normalisés (courbes ISO 834 ou ASTM E119) exposent des éprouvettes à un échauffement rapide (températures de four $\approx 1000^{\circ}\text{C}$) sous charge, et mesurent le temps jusqu'à la ruine (stabilité, intégrité, isolation – p. ex. R60 = 60 minutes).

Béton renforcé par textiles carbone (CTRC)

Des poutres en I renforcées par textiles carbone ont résisté à une sollicitation normalisée au feu jusqu'à 95 minutes sous charge statique. L'éclatement explosif (spalling) n'a pas dominé la ruine dans des formulations de béton adaptées ; le pontage des fissures par les fibres aide à conserver l'intégrité.

Béton armé « général » avec fibres/tissus carbone

Des éléments BA correctement dimensionnés atteignent > 60 minutes (souvent 90-120+ minutes) selon des cadres de calcul (p. ex. GB 50016 ou Eurocode 2). Les fibres de carbone (non combustibles) conservent des propriétés jusqu'à $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ avec une perte limitée avant oxydation. L'ajout de fibres de carbone (p. ex. 0,8% en volume) peut augmenter la résistance en compression résiduelle post-incendie d'environ 15% et améliorer globalement la résistance au feu par rapport à un béton sans fibres.

Renforcement externe par CFRP collé (EBR)

Sans protection, la performance est faible : l'adhésif époxy ramollit ou se décolle à 60-150°C (T_g typique), entraînant la perte de l'effet de renforcement en quelques minutes. Avec une protection incendie (p. ex. plaques ou revêtements), des essais à l'échelle 1 atteignent 60-120 minutes à fort taux d'utilisation. Des essais sur poutres EBR-CFRP protégées montrent une capacité maintenue lorsque l'adhésif reste sous une température critique.

Les propriétés résiduelles post-feu sont prometteuses : les fibres de carbone limitent la fissuration/le spalling par rapport à des bétons sans fibres, même si les fibres de polypropylène restent supérieures pour prévenir l'éclatement explosif dans les bétons à haute résistance.

2. Propriétés des matériaux dépendantes de la température

Facteur limitant principal : transition vitreuse / décomposition des polymères (résine/ revêtement) vs stabilité intrinsèque des filaments carbone et du béton.

Armatures carbone (selon TGA et essais de traction sur CTRC):

- **Revêtement (p. ex. SBR ou imprégnation similaire)** : décomposition débutant vers ~240°C (perte de masse initiale ~1,5%).
- **Oxydation du carbone (en air)** : début vers 400-450°C (selon vitesse de chauffe) ; décomposition complète vers 600°C (chauffe lente) à 750°C (chauffe rapide). En atmosphère inerte : pas d'oxydation jusqu'à 800°C+.
- **Rétention de résistance en traction (bandes CTRC, matrice béton fin)**
 - 20°C : ~1630 MPa (référence)
 - jusqu'à 400°C : 1100 MPa (67%)
 - 400-600/750°C : décroissance linéaire vers 550 MPa (34% nominal ; ~50% après ajustement de la perte de section par oxydation)
 - Rupture : rupture en traction des fibres restantes ; déformations mécaniques proches de l'ambiante jusqu'à ~500°C.
 - Module d'élasticité : stable jusqu'à ~500°C, puis décroît.
 - Dilatation/déformations thermiques : augmentation positive avec la température (influencée par l'ondulation du textile et l'interaction avec le béton) ; le CTE négatif des fibres carbone compense partiellement mais ne domine pas.

CFRP imprégné de polymère (barres, treillis ou renforcement externe)

- Chute rapide au-delà de la T_g de la résine (souvent 80-150°C pour vinylester/époxy) : 30-50% de perte de résistance à 200-350°C ; 80-90% de perte à 500-600°C.
- Module : perte 20-50% à 400-500°C.
- Adhérence au béton : dégradation marquée au-delà de 80-100°C par ramollissement de la résine.

Béton

La résistance en compression conserve ~50-70% à 400-600°C mais le spalling est un risque (réduit par fibres ou additifs PP). La conductivité thermique du CFRC est légèrement plus élevée du fait du carbone, mais reste isolante avec des enrobages suffisants.

Lecture simple de courbe de rétention (approximation)

- 20-400°C : perte graduelle/modérée (zone favorable pour carbone incorporé).
- ~400°C : accélération liée à l'oxydation / aux polymères – en conception, on suppose une contribution réduite voire nulle du renfort au-delà d'une température critique (souvent définie par 50% de perte, ~250-400°C selon le système).

3. Recommandations de conception au feu

Pour CFRC/CTRC incorporé (usage probablement principal):

- S'appuyer sur l'enrobage béton (souvent 20-40 mm) pour retarder l'échauffement des armatures – calculer le temps pour atteindre une température critique (~300-400°C) via des modèles de transfert thermique.
- Utiliser des matrices minérales/cimentaires (faible teneur organique) pour de meilleures performances que des systèmes fortement polymérisés.
- Intégrer des fibres hybrides (carbone + faible dosage PP) pour limiter le spalling.
- Concevoir selon des adaptations d'Eurocode 2 ou des principes ACI 440.11 : appliquer des facteurs de réduction k_{θ} (résistance) ; garantir des « zones froides »/un enrobage suffisant pour préserver l'adhérence. Viser R60-R120 pour dalles/voiles – atteignable avec panneaux minces en béton carbone grâce à la ductilité du renfort.

Pour applications externes / renforcement

I. CFRP collé (EBR : tissus/lamelles + époxy):

Sans protection, la performance au feu est généralement faible : la résistance de collage se dégrade rapidement lorsque l'adhésif approche sa T_g (souvent de l'ordre de 60-150°C selon systèmes), entraînant un décollement et la perte de l'effet de renforcement. Des protections (plaques/calciosilicate, enduits, systèmes validés) peuvent rétablir des durées de résistance significatives en maintenant l'interface sous la température critique.

II. Renforcement externe par béton carbone type CARBOrefit® (TRC/Carbonbeton en surcouche):

CARBOrefit® est un renforcement externe où un treillis carbone imprégné est noyé dans une couche minérale de béton fin (application manuelle ou projetée), en une ou plusieurs couches.

D'un point de vue feu, ce principe est plus proche d'un renforcement "incorporé" que d'un EBR : l'épaisseur minérale joue le rôle d'isolant thermique et retarde l'échauffement de l'armature carbone. Des essais sur éléments renforcés par TRC indiquent des résistances pouvant dépasser 60 minutes sous courbe ISO 834 pour des niveaux de charge représentatifs, avec des performances carbone supérieures à celles des textiles verre dans certains cas.

Les points sensibles restent:

- le risque d'éclatement/délaminage de la surcouche,
- la tenue de l'adhérence textile-matrice à chaud,
- la nature de l'imprégnation (les imprégnations polymères peuvent dégrader la performance à température élevée, raison pour laquelle des approches à imprégnation minérale sont activement développées).

Si une exigence de résistance au feu est demandée, une justification spécifique (essai ISO 834/ EN 1363 ou modélisation thermo-mécanique avec propriétés dépendantes de la température) est recommandée.

Recommandations de conception feu (spécifiques "CARBOrefit-like")

- Dimensionner la surcouche comme barrière thermique : l'épaisseur de carbonbeton (p.ex. 6-25 mm selon type/nombre de couches) conditionne directement la cinétique de chauffe du treillis.
- Réduire le risque de spalling/délaminage : formulation, humidité, préparation du support, et éventuellement microfibres PP dans des cas à risque (principe classique en ingénierie incendie du béton).
- Vérifier le rôle de l'imprégnation : si l'imprégnation est polymère (SBR/époxy ou similaire), consid possible de la performance à chaud ; c'est un point documenté sur TRC imprégné.
- Éviter l'analogie directe avec EBR : ici, l'interface critique n'est pas "époxy-béton", mais "surcouche-support" + "textile-matrice".