

École polytechnique de Louvain

Analyse des méthodes de calcul nécessaires au dimensionnement de passerelles composites

Auteurs: **Arnaud HENDRIX, Louis JADOUL**
Promoteurs: **Catherine DONEUX, Benoit PARMENTIER**
Lecteurs: **Laurent DELANNAY, Mustafa JAFARI**
Année académique 2018–2019
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes qui nous ont apporté leur soutien, leur aide et leurs encouragements pendant toute la réalisation de ce travail de fin d'étude. Un grand merci à nos familles et nos amis qui nous ont soutenus. Cela nous a permis de travailler dans les meilleures conditions.

Merci à nos promoteur.trice.s Catherine Doneux et Benoit Parmentier pour leurs idées, leur soutien et leurs encouragements ainsi que pour la confiance qu'ils nous ont témoigné durant le développement de ce travail. Leurs disponibilités et conseils nous ont permis d'avancer le plus sereinement possible.

Nous tenons aussi à remercier la société FiberCore Europe pour leur accueil et leurs éclairages sur les questions que nous avons rencontrées.

Merci également au Professeur Laurent Delannay et à Mustafa Jafari d'avoir accepté de faire partie de notre jury.

Résumé

Français

L'utilisation de matériaux composites renforcés de fibres (FRP) s'est bien développée au cours des dernières années dans le domaine du génie civil. Une application particulière met en avant les avantages de ce matériau : les passerelles piétonnes. Le développement des FRP est cependant freiné en raison d'aspects technologiques, financiers et normatifs. Il n'existe actuellement pas de norme internationale pour guider les dimensionnements d'ouvrages en FRP.

L'étude effectuée dans ce mémoire fait un tour de la littérature traitant de l'utilisation de ce matériau dans la construction et plus particulièrement dans les passerelles. Une analyse comparative des normes et guides existants dans plusieurs pays est ensuite développée selon plusieurs critères tels que le domaine d'application, les critères ELS et ELU exprimés, les coefficients de sécurité appliqués et la détermination des valeurs caractéristiques. Afin de rendre tangible cette comparaison, ces normes sont appliquées pour le calcul et design d'une passerelle de 15m de portée et 4m de large. Des approches différentes sont ainsi soulignées en fonction des guides utilisés.

Les approches utilisant des profilés pultrudés préconisées par le guide des USA et par Fiberline mèneront à une structure en treillis avec des profilés massifs. Une application des guides CUR96 et "Prospect for new guidance in the design of FRP" (JRC Prospect) permet plus de libertés dans le choix du design et conduit à plus d'optimisation dans la structure. Néanmoins, quelques différences subsistent entre ces deux guides. Les coefficients de sécurité à l'ELU sont sensiblement différents, mais cela n'impacte pas le dimensionnement qui est dicté par les conditions d'ELS.

English

The use of fibre-reinforced polymer (FRP) has developed in recent years in the field of civil engineering. One particular application allows a good use of the advantages of the material : pedestrian bridges. However, the development of FRP is hampered by technological, financial and normative aspects. One of the reasons is that there is currently no international standard to guide FRP design.

The study in this paper reviews the literature about the use of this material in the construction field and specifically to footbridges. A comparative analysis of existing standards and guides in several countries is then developed according to several criteria such as the scope of application, the ULS and SLS requirements, the safety factors applied and the determination of characteristic values. In order to make this comparison more practical, these standards are then applied to the calculation and design of a footbridge. Various solutions are highlighted depending on the guidelines used.

Approaches using pultruded profiles recommended by the US guideline and Fiberline will lead to a truss structure with solid profiles. An application of the CUR96 and "Prospect for new guidance in the design of FRP" (JRC prospect) guides allows more freedom in the designing phase and leads to a better optimization in the structure. However, some differences remain between those two guides. The ULS safety factors are significantly different but they do not impact the design which depends only on the SLS conditions.

Liste des Symboles et Abréviations

La liste suivante décrit les symboles qui seront utilisés dans ce mémoire ainsi que les unités qui y sont en général associées.

Symboles

ϵ	Déformation admissible à la rupture	%
η	Coefficient de sécurité, usuellement ≤ 1	-
γ	Coefficient de sécurité, usuellement ≥ 1	-
μ	Coefficient de Poisson	-
ρ	Masse volumique	g/cm^3
σ_t	Contrainte en traction	MPa
E_t	Module de traction	GPa
f_b	Résistance à la flexion	MPa
f_c	Résistance en compression	MPa
f_t	Résistance en traction	MPa
G	Module de cisaillement	MPa
R	Quand on parle de fatigue, la valeur R est égale à $\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$	-
V	Volume	m^3
V_c	Proportion de résine au sein d'un composite	%
V_f	Proportion de fibres au sein d'un composite	%
X_0	Le 0 en indice indique que le symbole X s'applique selon une direction dans le sens des fibres	

X_c	Le c en indice indique que le symbole X s'applique au composite
X_f	Le f en indice indique que le symbole X s'applique aux fibres
X_m	Le m en indice indique que le symbole X s'applique à la matrice
X_{90}	Le 90 en indice indique que le symbole X s'applique selon une direction transversale par rapport aux fibres
X_x	Le x en indice indique que le symbole X s'applique selon la direction principale de l'élément
X_y	Le y en indice indique que le symbole X s'applique perpendiculairement à la direction principale, dans le plan horizontal de l'élément

Abréviations

ELS	Etat Limite de Service
ELU	Etat Limite Ultime
RSA	Logiciel Robot Structural Analysis

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Définition d'un Matériau Composite	2
1.2	Définition d'un FRP	2
1.2.1	Fibres	2
1.2.2	Matrice	4
1.2.3	Interface	5
1.3	Mise en Oeuvre des FRP	5
1.3.1	Pultrusion	5
1.3.2	Empilement Manuel	6
1.3.3	Pulvérisation	6
1.3.4	Moulage	7
1.3.5	Injection Sous Vide	8
1.3.6	Enroulage Filamentaire	8
1.4	Historique d'Utilisation dans la Construction	8
1.5	Spécificités des Composites en Génie Civil	9
1.6	Limitations Techniques des FRP	10
2	Les Matériaux Composites dans la Construction	12
2.1	Propriétés Mécaniques	12
2.1.1	Masse Volumique	13
2.1.2	Module d'Elasticité	14
2.1.3	Coefficient de Poisson	16
2.1.4	Résistance	17
2.1.5	Influence du Mode de Production	18
2.2	Application des FRP aux Passerelles	19
2.2.1	Protection	20
2.2.2	Rénovation et Réparation	20
2.2.3	Passerelles Piétonnes et Cyclistes	21
2.2.4	Avantages et Inconvénients	28
2.3	Ouvrages Existants	29
2.3.1	Portées	29

2.3.2	Localisation	30
2.3.3	Matériaux	31
2.3.4	Systèmes statiques	33
2.3.5	Exemples Types	35
2.3.6	Bilan	41
3	Analyse des Normes de Calcul Existantes	43
3.1	Origine et Domaine d'Application	44
3.2	Détermination des Valeurs Caractéristiques	46
3.3	Facteurs partiels et coefficients	47
3.4	Fatigue	53
3.5	Critères ELU	55
3.6	Critères ELS	57
3.7	Conclusion	58
4	Application des Méthodes de Dimensionnement	59
4.1	Cahier des charges	59
4.1.1	Structure	59
4.1.2	Charges	60
4.1.3	Critères dimensionnant	60
4.2	Méthodologie Appliquée	61
4.3	Solution Acier	62
4.3.1	Choix Structurels	62
4.3.2	Système Porteur	63
4.3.3	Tablier	65
4.3.4	Garde-Corps	65
4.3.5	Assemblages	67
4.3.6	Résumé	68
4.4	Première Solution Composite	69
4.4.1	Choix Structurels	69
4.4.2	Système Porteur	70
4.4.3	Tablier	73
4.4.4	Vérification à la fatigue	74
4.4.5	Garde-Corps	75
4.4.6	Assemblages	75
4.4.7	Résumé	76
4.5	Deuxième Solution Composite	76
4.5.1	Choix Structurels	76
4.5.2	Système Porteur	77
4.5.3	Vérifications ELU propres aux FRP	80
4.5.4	Garde-Corps	81

4.5.5	Assemblages	81
4.5.6	Résumé	81
4.6	Bilan	82
5	Idées Reçues et Limitations Réelles des Composite dans les Passerelles	83
5.1	Coût des FRP	83
5.2	Durée de Vie	84
5.3	Fatigue	85
5.4	Portée des Passerelles	86
5.5	Impact Environnemental	87
6	Conclusion et Perspectives	89
A	Ouvrages Existants	98
B	Notes de calcul	101
B.1	Solution Acier	101
B.1.1	ELU - poutres porteuses - IPE 600	101
B.1.2	Fréquences propres de la structure	105
B.2	Solution Composite 1	106
B.2.1	Références profilés Strongwell	106
B.2.2	Critères ELS - Sorties RSA	131
B.2.3	Critères ELU - Sorties RSA	132
B.3	Solution Composite 2	134
B.3.1	Critères ELS - CUR96 - Sorties RSA	134
B.3.2	Critères ELU - CUR96 - Sorties RSA	137

Chapitre 1

Introduction

Depuis quelques dizaines d'années, l'utilisation des matériaux composites dits Fiber Reinforced Polymer ou FRP est en constante progression dans le domaine du génie civil. Profitant de ses nombreux avantages en termes de durabilité, de légèreté et de facilité de mise en oeuvre, les FRP ont su s'imposer petit à petit comme une alternative valable au béton armé et à l'acier. Néanmoins, ce matériau génère encore de la réticence tant auprès des ingénieurs que des maîtres d'ouvrage en raison d'une moins bonne connaissance de ses propriétés, de son vieillissement ainsi que de son coût final. Une application de génie civil se démarque néanmoins et permet aux FRP un beau développement, il s'agit des passerelles piétonnes et cyclistes. Etant donné qu'elle ne doivent pas de supporter de charges trop lourdes telles que celles générées par des poids lourds, ces passerelles de tailles raisonnables sont le créneau idéal pour lancer le composite sur le marché de la construction. Des développements avancés avec ce matériau dans le domaine du génie civil existent déjà dans d'autres pays et régions du monde contrairement à la Belgique où les passerelles en composites se comptent sur les doigts d'une main.

L'idée de réaliser un mémoire sur un sujet se rapportant à l'utilisation des composites dans la construction est venue de discussions avec le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). Nous nous sommes attelés à la compréhension du matériau composite, ses spécificités, les différentes possibilités qui en découlent et sa mise en oeuvre dans le génie civil. Les possibilités actuelles des FRP ainsi que certains ouvrages existants ont aussi été soigneusement étudiés. Ces développements nous ont amenés à analyser et comparer les normes et méthodes de calculs existantes pour ce matériau et son application aux passerelles. Suite à cette comparaison nous avons appliqué et comparé ces méthodes et normes à un cas type de passerelle.

1.1 Définition d'un Matériau Composite

Un matériau composite est une combinaison d'au moins deux matériaux aux propriétés mécaniques différentes se complétant d'un point de vue mécanique. Ceux-ci sont assemblés selon des proportions et agencements spécifiques de telle sorte que le produit fini aura une ou plusieurs propriétés optimisées par rapport aux matériaux initiaux.

Dans le domaine de la construction, nous pouvons utiliser ce terme pour plusieurs matériaux tels que le torchis, dans lequel les fibres végétales (de la paille par exemple) renforcent l'argile mais aussi dans le cas du béton armé où le renforcement du béton se fait via l'utilisation d'armatures en acier.

Après avoir été développés dans le secteur aéronautique, les Polymères Renforcés de Fibres (FRP en anglais) sont arrivés petit à petit dans le domaine du génie civil. Dans cette combinaison, des tissus de fibres à haute résistance sont liés dans une matrice polymérique afin de former un matériau technologiquement avancé et pouvant relever de nombreux défis.

1.2 Définition d'un FRP

FRP sont les initiales pour Fiber Reinforced Polymer (ou polymère renforcé de fibres). Ces initiales désignent un matériau composé d'une matrice en résine renforcée par des fibres à haute résistance. Ce sont ces fibres qui reprennent la grande majorité des efforts dans le matériau. Quant à la résine, elle :

- maintient les fibres dans la forme géométrique voulue
- transfère les forces entre les fibres
- protège les fibres de l'influence de l'environnement
- évite les instabilités de flambement des fibres car étant donné leur finesse et leur flexibilité, celles-ci ne sauraient reprendre que de l'effort en tension sans résine

Dans la suite de ce travail nous allons par abus de langage parler du "matériau composite" pour les FRP et inversement tandis que le béton armé ou tout autre combinaison de matériaux seront nommés par leurs noms.

1.2.1 Fibres

Type

Il existe trois types de matériaux principaux pour produire les fibres utilisées dans la construction :

- Le verre : il s'agit d'un dérivé du verre, principalement composé d'oxyde de silicium. D'autres oxydes sont ajoutés en proportions spécifiques donnant

lieu à différents types de fibres de verre, aux propriétés et usages variés. Ce mélange est chauffé et refroidi par cycles avant d'être étiré en filaments de quelques micromètres d'épaisseur.

- L'aramide : les fibres de polyamides aromatiques sont faites à base d'un polymère étiré en filaments puis refroidi. Les différentes compositions polymériques engendrent des fibres possédant différentes caractéristiques mécaniques.
- Le carbone : ces fibres à haute performance sont produites par pyrolyse et par cristallisation de précurseurs (bien souvent du polyacrylonitrile) à haute température. Durant ce processus, les cristaux sont orientés longitudinalement aux fibres.

Formes

Une fibre est un filament de matériau d'environ une dizaine de μm de diamètre. Elles sont couplées afin de former des fils qui seront eux même assemblés pour former des tissus. Il existe différents types de fils et de tissus selon la configuration d'assemblage :

- Fil lisse : mèche de filaments accolés longitudinalement de manière libre
- Fil entrelacé : mèche de filaments accolés longitudinalement et mécaniquement connectés par des filaments enroulés autour
- Fil emmêlé : mèche de filaments accolés longitudinalement et mutuellement entrelacés pour assurer une meilleure connexion mécanique

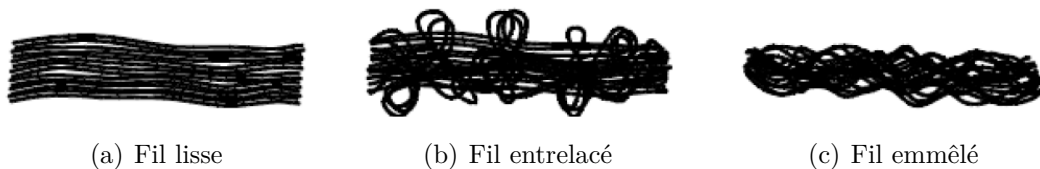


FIGURE 1.1 – Agencements de fils [1]

Assemblages

Les fils sont assemblés avant d'être utilisés. Au sein de ces assemblages, la quantité de fibres peut varier selon les directions afin d'obtenir une anisotropie et gagner en résistance dans une direction particulière. Les principales caractéristiques recherchées pour un tissu sont la densité de fibres ainsi que leurs orientations mais l'éventail de possibilité est bien plus large que ces 2 critères [2]. Les principaux assemblages utilisés dans les FRP sont Schématisés sur la figure 1.2. Une fois combinés au sein du matériau, chaque tissu constitue une couche appelé "pli".

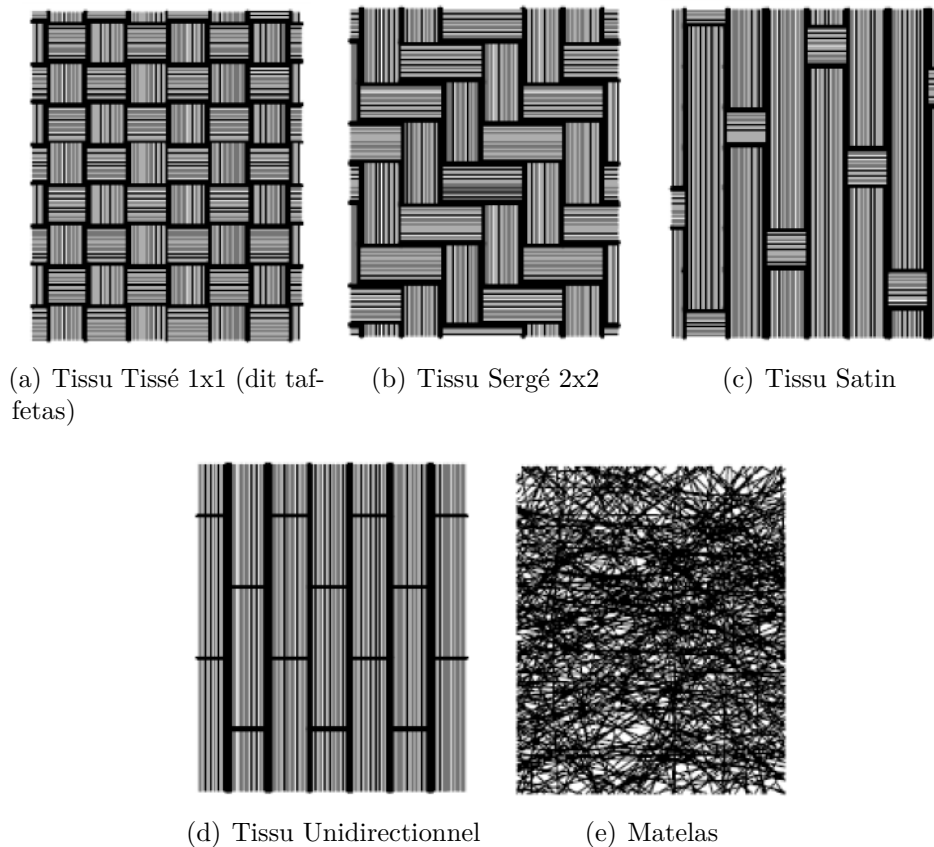


FIGURE 1.2 – Exemples d’assemblages de fils [1]

1.2.2 Matrice

Types de Résines

- Les thermoplastiques : elles peuvent être déformées et reformées par simple échauffement et sont caractérisées par de faibles raideur et résistance.
- Les thermodures : malgré leur caractère plus fragile que les thermoplastiques, ce sont les résines les plus fréquemment utilisées dans le domaine de la construction. Une fois durcies, elles ne peuvent pas être fondues et reformées. Ayant une plus grande rigidité que les thermoplastiques, elles procurent une stabilité géométrique à l’ouvrage ainsi qu’une bonne résistance à la température et aux attaques chimiques.[3]

Le polyester est la résine la plus répandue car elle procure au composite de bonnes propriétés tout en restant économique. L’époxy est essentiellement utilisée avec les fibres de carbone tandis que le phénol est utilisé lorsque les critères de dimensionnement au feu sont importants.[1]

1.2.3 Interface

Pour obtenir une bonne jonction entre les fibres et la matrice, une bonne adhérence et des propriétés mécaniques compatibles sont nécessaires.

L'adhérence est assurée par une liaison chimique fibre-matrice. Afin d'optimiser celle-ci il faut choisir un ensimage adéquat lors de la fabrication des fibres. Celui-ci sera différent selon la nature de la résine. De plus, afin d'éviter la formation de micro-fissures dans la matrice avant l'élongation maximale de la fibre, la déformation ultime de la matrice doit être plus grande que celle des fibres. Cela permettra de limiter la fragilité du composite.

1.3 Mise en Oeuvre des FRP

La plupart des ouvrages en FRP dans le génie civil sont uniques et nécessitent un design sur mesure. Pour atteindre les dimensions nécessaires à un ouvrage de type pont/passerelle, deux possibilités existent. La première consiste à assembler des éléments de type profilés à l'aide de colles ou d'assemblages mécaniques, la deuxième est de mouler en une pièce l'entièreté ou une partie de l'ouvrage. Dans ce deuxième cas de figure, il a fallu trouver le moyen de mouler le FRP aux dimensions requises pour chaque projet sans faire exploser le coût de production à cause d'un moule qui serait à usage unique.

1.3.1 Pultrusion

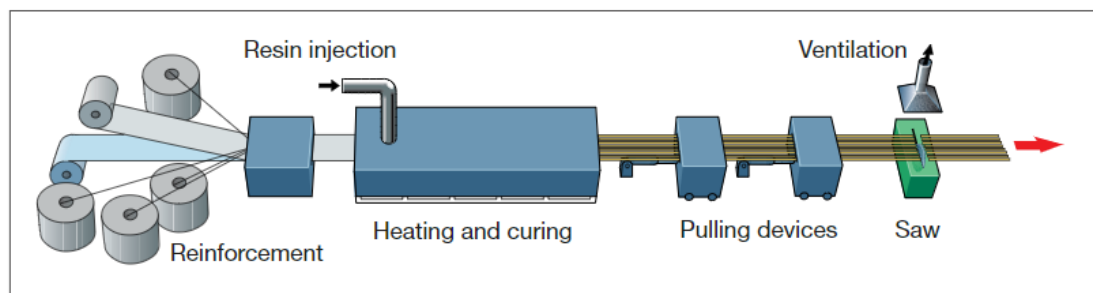


FIGURE 1.3 – Schéma du procédé de pultrusion[3]

La pultrusion est un procédé qui permet de fabriquer des profils de section constante en continu. La qualité du produit fini et l'homogénéité de ses propriétés sont garanties par l'automatisation du processus. Celui-ci consiste à tirer continuellement les fibres à travers un guide dans lequel elles sont placées selon la disposition voulue. Ces fibres passent ensuite dans un équipement où elles sont imprégnées de

la matrice. Le tout est ensuite chauffé afin de cuire le matériau composite dans la forme finale souhaitée. Le profilé peut ensuite être coupé à la longueur désirée.[1, 3]



FIGURE 1.4 – Equipements de la chaîne de pultrusion de Fiberline[3]

1.3.2 Empilement Manuel

La méthode d'empilement est un procédé manuel de mise en oeuvre des FRP qui demande beaucoup de main d'oeuvre. La résine est appliquée manuellement par l'ouvrier à l'intérieur d'un moule et les fibres, en général des tissus, sont placées par dessus. Ces fibres sont ensuite imprégnées et puis comprimées à l'aide d'un rouleau, lui aussi manié par l'ouvrier, afin d'obtenir un matériau le plus homogène possible et sans bulles d'air résiduelles. Ces trois étapes soient l'application de la résine, la pose du renfort et la compression avec le rouleau, sont répétées jusqu'à obtenir l'épaisseur souhaitée.

Cette méthode est limitative au niveau de la régularité des produits. En effet le pourcentage de fibres et le contrôle de la qualité sont diminués. De plus, la main d'oeuvre est exposée aux vapeurs des solvants présents dans la résine. Cette exposition est dangereuse et des normes protégeant les travailleurs sont d'application, ce qui génère un surcoût afin d'assurer la sécurité des ouvriers.

1.3.3 Pulvérisation

Cette méthode manuelle consiste, comme son nom l'indique, à pulvériser un mélange de résine et de fibres sur un moule à l'aide d'un spray. Les fibres utilisées

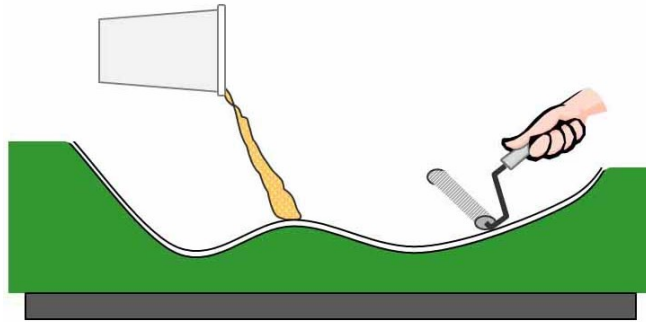


FIGURE 1.5 – Schéma du procédé d'empilement [4]

sont courtes (entre 1 et 4cm). Les avantages de ce procédé par rapport à l'empilement manuel sont la rapidité et le coût. Par contre, l'épaisseur de composite est difficilement contrôlable, de même que le rapport volumique fibres/résine.[1]



FIGURE 1.6 – Procédé de pulvérisation [5]

1.3.4 Moulage

Le moulage (aussi appelé RTM pour Resin Transfer Molding) est un procédé qui fait intervenir un moule et un contre-moule. Les fibres sont mises en place dans le moule avant que celui-ci ne soit fermé par le contre-moule et que la résine soit injectée sous pression. Ce procédé permet d'obtenir des pièces de grande qualité en raison de l'automatisation des différentes étapes. Cette méthode n'est pas adaptée au génie civil car ce domaine demande des pièces uniques et de grandes tailles alors que le moulage fournira des pièces à partir d'une relativement grande série et d'une taille de pièce raisonnable.

1.3.5 Injection Sous Vide

La méthode d'injection sous vide est un procédé semi-automatisé permettant la fabrication de grandes pièces en une seule opération de moulage. Le moule solide sert de base sur la partie inférieure de la pièce tandis que la partie supérieure est libre. Une fois les fibres installées dans le moule selon l'orientation voulue, un sac d'étanchéité est mis en place et scellé. La résine est ensuite injectée entre les fibres du composite grâce au vide créé par la pompe. L'injection peut se faire à chaud ou à température ambiante. Pour la fabrication de grands éléments, plusieurs points d'injection et plusieurs points de pompage sont nécessaires.[6, 7]

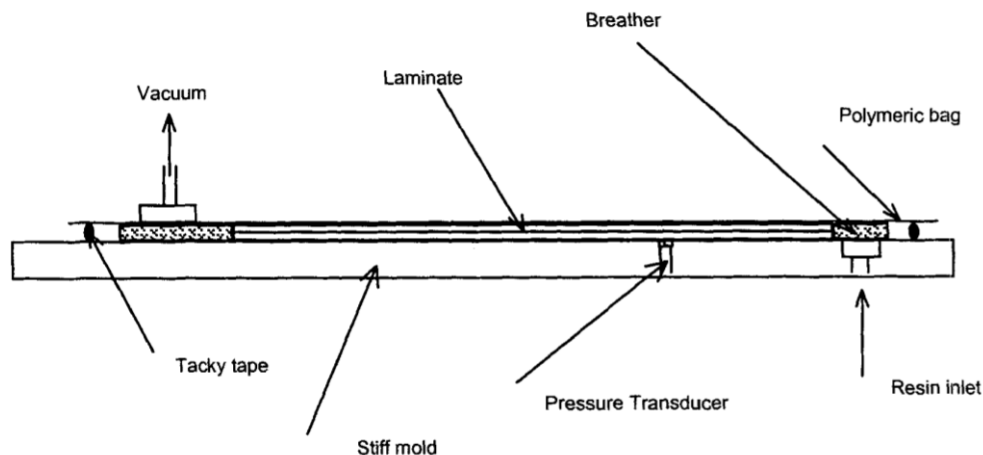


FIGURE 1.7 – Schéma du procédé d'injection sous vide[6]

1.3.6 Enroulage Filamentaire

L'enroulage filamentaire est un procédé permettant la fabrication d'éléments creux par enroulage des fibres autour d'une matrice en rotation. Les fibres passent par un bain de résine avant d'être guidées pour avoir l'angle voulu sur le mandrin. Le processus de curage de la résine peut se faire après que l'élément ait été retiré du mandrin afin d'avoir un rythme de production plus élevé. [1, 8]

1.4 Historique d'Utilisation dans la Construction

Dans le domaine de la construction, l'utilisation des FRP est très récente en comparaison aux autres matériaux traditionnels (bois, pierre, maçonnerie, acier, béton). En effet, la première utilisation structurelle des FRP date de 1982 en Chine où un pont d'une portée de 20.7m a été bâti, utilisant des poutres en

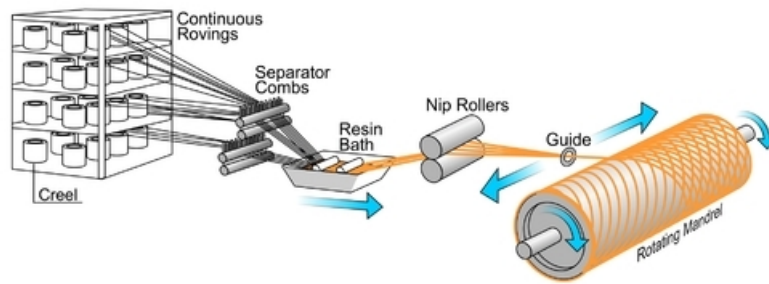


FIGURE 1.8 – Schéma du procédé d'enroulage filamentaire [9]

composites.[1] Les expériences réalisées avec ce matériau sont donc récentes et de nombreux développements d'applications en génie civil peuvent être attendus.[10] Depuis les années 1990 les FRP connaissent une croissance rapide. De plus en plus de publications apparaissent et l'industrie suit le mouvement, percevant les possibilités qu'apportent ce nouveau matériau. Aujourd'hui plus de 350 ponts et passerelles totalement ou partiellement fabriqués à partir matériaux composites ont été construits, principalement aux Pays-Bas, aux Etats-Unis et dans les Pays Scandinaves.

1.5 Spécificités des Composites en Génie Civil

Ce nouveau matériau a de multiples avantages particulièrement intéressants dans le domaine de la construction.

1. Les caractéristiques mécaniques ramenées au poids du matériaux sont largement à l'avantage des FRP par rapport aux autres matériaux. Une comparaison complète est faite dans le tableau 1.1. Celui-ci montre que l'avantage le plus marqué des FRP est son rapport résistance/poids, lequel laisse présager des structures très résistantes vis-à-vis de leurs poids propres.
2. Les matériaux composites ont une durabilité dans le temps présumée élevée [13]. Ils subissent peu de vieillissement par rapport à l'acier et au béton. Le vieillissement des FRP varie principalement en fonction du type de matrice utilisée, les facteurs à prendre en compte sont l'exposition aux rayonnements UV, l'humidité et les contacts avec l'eau ainsi que le fluage sous charges permanentes. Néanmoins, il est important de prendre quelques précautions avec cet avantage de durabilité car l'expérience actuelle n'a pas encore atteint les limites temporelles théoriques des ouvrages en FRP.

	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	$f_{y,t}$ [MPa]	$f_{y,c}$ [MPa]	E/ρ	f_y/ρ
Acier S235	7800	210000	235	235	26.9	0.03
Acier S355	7800	210000	355	355	26.9	0.045
Béton C30/37	2500	27000	–	30	10.8	0.0012
Bois GL24h[11]	380	11600	16.5	24	30.5	0.043–0.063
FRP carbone (50% de fibres)[12]	1600	70000	1100	800	43.75	0.5–0.69
FRP verre (50% de fibres)[3]	2000	23000	240	240	11.5	0.12

TABLE 1.1 – Comparaison massique des différents matériaux traditionnels de la construction

- Il est bon de garder à l'esprit que les domaines d'applications des matériaux composites sont vastes et que ce n'est pas en génie civil que ce matériau est le plus exploité. En aéronautique et dans les équipements sportifs, les composites et particulièrement ceux faisant intervenir des fibres de carbone, sont largement répandus et leurs avantages ne sont plus à démontrer en termes de légèreté, de rigidité et de facilité de production à la chaîne. Et c'est justement dans le processus de production que se situe la grande différence entre le génie civil et les autres domaines d'application. En aéronautique par exemple, où le poids et la forme sont des critères fondamentaux, des moules de formes complexes et fortement optimisées peuvent être construits afin de maximiser l'avantage des propriétés du matériau. En génie civil et dans le cas particulier des passerelles, les critères principaux seront la résistance et la rigidité. Le dimensionnement sera donc moins poussé vers une optimisation des formes mais afin d'obtenir une solution viable avec une forme économiquement réalisable. De plus, les dimensions des réalisations de génie civil seront d'un autre ordre de grandeur que la plupart des autres utilisations de ce matériau (exception faite des pales d'éoliennes et des avions) et la quantité de reproduction des éléments est beaucoup plus faible.

1.6 Limitations Techniques des FRP

Tout ne peut pas se construire avec les FRP puisque, comme tout matériau, il possède des limitations techniques et technologiques. Ces limitations sont repoussées toujours plus loin grâce aux recherches et les limites rencontrées aujourd'hui ne seront certainement pas les limites de demain.

L'épaisseur possible des FRP est limitée afin de garder des propriétés constantes

au sein du matériau. Actuellement et quelque soit la résine utilisée, pour que la cure se fasse dans de bonnes conditions, il est nécessaire de limiter l'épaisseur à 100 *mm* [14].

Une autre limitation est le pourcentage de fibre possible dans le composite. Celui-ci est de 50 à 60% maximum. Il est possible de tendre vers les 70% mais les techniques nécessaires (RTM) sont difficilement applicables aux éléments de génie civil.

Chapitre 2

Les Matériaux Composites dans la Construction

2.1 Propriétés Mécaniques

Les caractéristiques d'un FRP dépendent de ses composants, de leur proportion ainsi que de l'orientation des fibres. Chaque combinaison d'un certain type de fibre avec un certain type de matrice aura donc des propriétés différentes pouvant à chaque fois être optimisées pour son utilisation.

Les valeurs du Tableau 2.1 sont issues de la littérature et ne sont modérées par aucun coefficient. Lors de l'application de ces caractéristiques à des calculs de dimensionnement, il faudra se référer aux valeurs et coefficients propres à chaque guide. Au niveau des fibres, le Tableau 2.1 montre que la plus légère est l'aramide

	Verre-E	Verre-S	Carbone HE	Carbone HR	Kevlar 29	Kevlar 49
$\rho [g/cm^3]$	2.54	2.5	1.9	1.7	1.45	1.45
$E_t [GPa]$	70	86	400	240	80	130
$\sigma_t [GPa]$	3.45	4.5	1.8	2.6	2.8	2.8
$\epsilon [\%]$	4.8	5.7	1.5	0.8	3.5	2.5
Coût Relatif	Faible	Moyen	Elevé	Elevé	Moyen	Moyen

TABLE 2.1 – Propriétés de différents types de fibre [15]

(ou kevlar), suivie du carbone puis du verre. Le carbone est de loin le plus rigide tandis que la résistance du verre est sensiblement plus importante que celle des autres fibres. Le verre est également celui qui accepte la plus grande déformation avant la rupture. Couplé à un faible coût relatif, la fibre de verre devient naturellement le premier choix dans le domaine de la construction.

En effet, son poids propre reste très faible comparé aux matériaux classique tels que le béton ou l'acier et sa déformation admissible est également un atout par rapport aux autres types de fibres.

	Polyester	Epoxy	Phénol
Masse volumique [g/cm^3]	1.2 - 1.4	1.2 - 1.4	1.1 - 1.4
Module de Traction [GPa]	2.5 - 5	2.7 - 4.1	1.6 - 4.1
Résistance à la Traction [MPa]	50 - 110	35 - 60	35 - 95

TABLE 2.2 – Propriétés typiques des résines thermodures [15]

Concernant les résines thermodures, les propriétés mécaniques (voir Tableau 2.2) sont à peu près semblables mis à part une résistance à la traction légèrement plus importante pour le polyester. Ces faibles différences s'expliquent par le fait que différentes compositions peuvent être réalisées pour ces types de résine, permettant de jouer sur les propriétés mécaniques en fonction du but recherché.

Il est important de noter que le phénol possède un excellent comportement au feu et au niveau des dégagements de fumée. Il résiste également bien à l'usure, aux attaques chimiques et thermiques mais rejette de l'eau lors du durcissement ce qui le rend moins facile à manipuler. Il est également utilisé lorsque des propriétés électriques sont requises.[15]

L'epoxy quant à lui présente l'avantage de pouvoir être mélangé avec des epoxy thermoplastiques afin de diminuer sa fragilité. Son principal inconvénient reste le prix.[15]

Enfin, le polyester peut également être mélangé afin d'être rendu plus ductile (en particulier le vinylester), et il coûte moins cher que l'epoxy. De plus, il est très résistant au vieillissement. Cela lui vaudra d'être la résine la plus répandue dans le milieu de la construction.[1, 15]

2.1.1 Masse Volumique

L'un des grands avantages du FRP est sa faible densité. Elle permet au matériau d'avoir d'excellentes propriétés mécaniques spécifiques (voir Tableau 2.1) et donc d'être, à armes égales, bien plus léger que les matériaux traditionnels de la construction. En effet, là où l'acier a une masse volumique d'environ $7.8g/cm^3$ et le béton de $2.5g/cm^3$, celle des FRP varie généralement entre $1.2g/cm^3$ et $1.8g/cm^3$. Grâce à cela, le transport et la mise en oeuvre sont simplifiés, tandis que les charges sur les fondations sont diminuées. Cela permet en général de réduire considérable-

ment le coût de l'ensemble de l'ouvrage et donc de combler la différence de prix entre une structure en matériaux classiques et une structure en FRP.

Chaque composite aura sa propre densité, mais il est relativement simple de déterminer celle d'un cas précis, si les matériaux et proportions sont connus, grâce à cette formule :

$$\rho_c = \rho_f * V_f + \rho_m * V_m$$

2.1.2 Module d'Elasticité

Le module de Young est fortement dépendant du type de fibres utilisées ainsi que de leur orientation.

Nous pouvons observer dans le Tableau 2.3 que, dans le sens des fibres, le module d'élasticité du carbone est (pour une même proportion) plus de 3 fois plus élevé que celui du verre. Par contre, transversalement aux fibres, la situation s'inverse et le verre est presque 3 fois plus rigide que l'aramide.

Ce tableau met aussi en avant l'importance de l'orientation des fibres. Les écarts sont encore plus importants entre les deux directions d'une même fibre qu'entre les différents types de fibre.

	$E_0[GPa]$	$E_{90}[GPa]$
Verre-Polyester	54.1	14.05
Carbone-Epoxy	181	10.3
Aramide-Epoxy	75.86	5.45

TABLE 2.3 – Valeurs type de module d'élasticité pour un FRP unidirectionnel avec 55% de fibres [1]

Comme le montre la Figure 2.1, la fibre travaille à 100% de ses capacités lorsque la sollicitation est dans l'axe de celle-ci. C'est alors le module longitudinal qui est à utiliser. Dans le cas où la sollicitation est perpendiculaire à la fibre, c'est le module transversal qui atteint son maximum.

Lorsque les fibres sont orientées de manière aléatoire, l'estimation du module d'élasticité devient plus complexe. En effet, l'orientation des fibres d'un matelas est tout aussi importante que les différents diamètres et longueurs des fibres présentes[16]. Afin d'obtenir une valeur il faut appliquer la loi des mélanges :

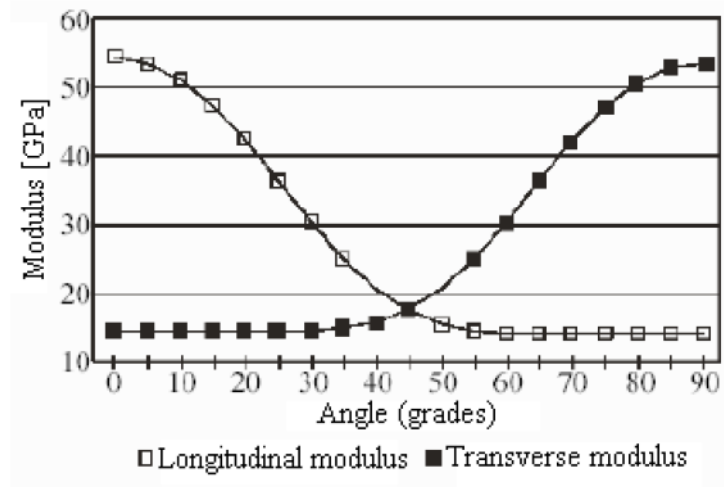


FIGURE 2.1 – Evolution du module longitudinal et transversal selon l'orientation des fibres pour un composite unidirectionnel[1]

$$E_c = \phi_e * V_f * E_f + (1 - V_f) * E_m$$

$$\phi_e = 1 - \frac{\tanh(p)}{p}$$

$$p = \frac{2 * l}{d} * \left(\frac{G_m}{E_f} \right)^{1/2} * \left(\frac{-1}{\ln(V_f)} \right)^{1/2}$$

où d et l sont respectivement les diamètres et longueurs moyens des fibres.

$$E_0 = E_f * V_f + E_m * V_m$$

$$E_{90} = \frac{E_f * E_m}{E_f * V_f + E_m * V_m}$$

2.1.3 Coefficient de Poisson

De par son anisotropie, les propriétés mécaniques d'un FRP varient de manière importante selon l'orientation. C'est particulièrement le cas pour le coefficient de Poisson qui, dans le sens des fibres, sera similaire à l'acier (env. 0.3). Mais comme nous pouvons l'observer dans la Figure 2.2, ce coefficient peut varier de 0.02 (perpendiculairement) à 0.65.

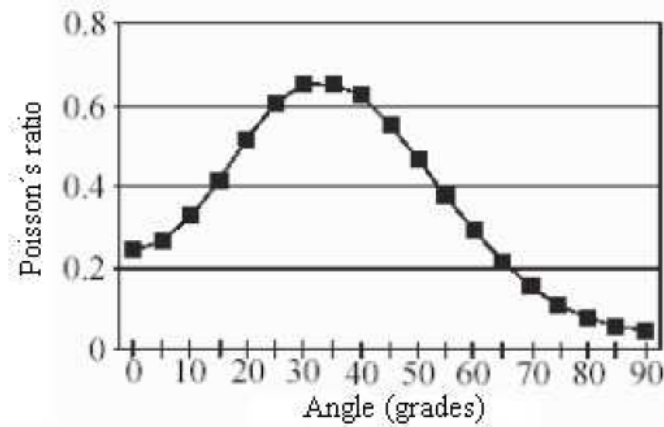


FIGURE 2.2 – Evolution du coefficient de Poisson selon l'orientation des fibres[1]

Une fois encore, la formule pour μ est similaire et fait intervenir les proportions de fibres et de matrice.

$$\mu = \mu_f * V_f + \mu_m * V_m$$

2.1.4 Résistance

La résistance d'un FRP est dictée par celles de ses composants ainsi que leur proportion, mais elle est limitée par la déformation à la rupture des fibres. En effet, une fois cette déformation atteinte, seule la matrice pourrait reprendre les sollicitations mais les contraintes sont en général déjà plus élevées que sa résistance. Le FRP aura donc atteint la rupture à ce niveau de sollicitations là.

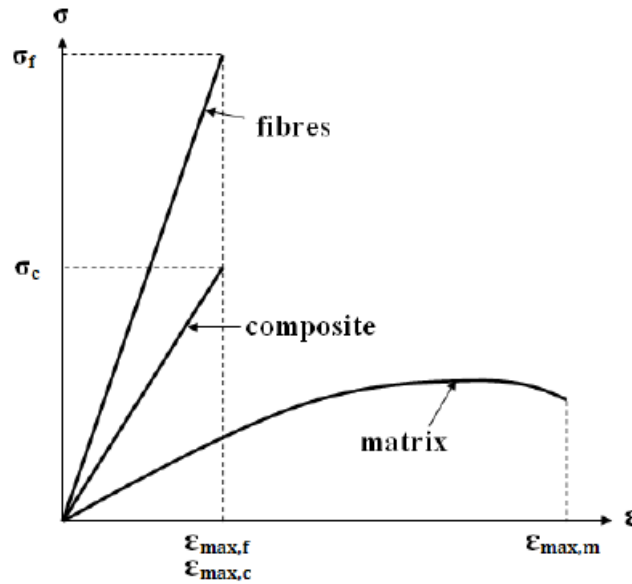


FIGURE 2.3 – Relation contrainte-déformation d'un FRP et de ses composantes [1]

La relation observée dans la Figure 2.3 est faite en assumant une déformation maximale de la matrice bien plus grande que celle des fibres. De cette manière, la courbe du composite peut être considérée comme linéaire étant donné que la courbe de la matrice est linéaire sur cette partie.

Sous l'hypothèse d'une interface parfaite, la résistance d'un FRP peut être calculée comme suit :

$$\sigma_c = \sigma_f * V_f + \sigma_m * V_m$$

Cependant, ce n'est pas toujours le cas dans la réalité. De petites fissures peuvent apparaître dans la matrice, les fibres peuvent se délaminer, la matrice peut se déformer de manière visco-élastique, ... La relation contrainte déformation du composite n'est donc plus simplement linéaire.

Lorsque la première fibre rompt en traction, la matrice peut encore être capable d'empêcher la rupture complète grâce à la re-répartition des efforts sur les fibres voisines. Toutefois, par sécurité, ce caractère ductile n'est pas pris en compte par

	Verre	Carbone	Aramide
Résistance à la traction [MPa]	760-1690	1930-2689	1150-1380

TABLE 2.4 – Valeurs type de résistance à la traction pour un FRP unidirectionnel avec une matrice époxy[17]

les fabricants qui donnent la résistance de leur composite. Dans certains cas, cette ductilité permettrait de doubler la résistance annoncée tel qu’illustré à la Figure 2.4.

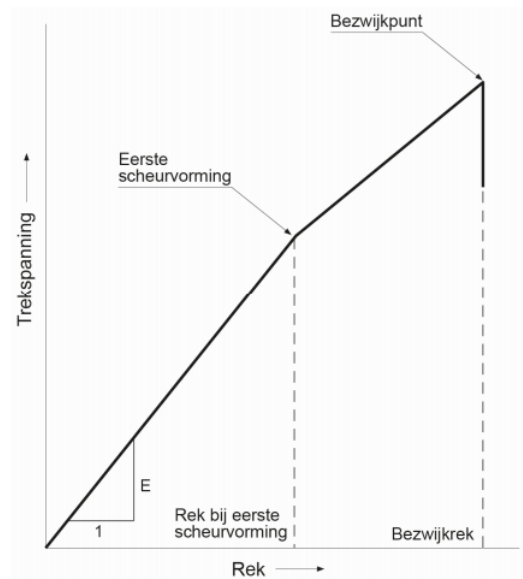


FIGURE 2.4 – Comportement d’un laminé multi-couches [18]

2.1.5 Influence du Mode de Production

Les proportions de fibres et de résine ont une forte influence sur les propriétés du composite, tout comme l’orientation de ces fibres. La méthode de production du composite est un autre paramètre clef. Un FRP fabriqué de manière automatisée aura peu ou pas d’imperfections comparé au même produit mis en oeuvre manuellement. Cela est dû aux phénomènes de compaction des couches, des efforts internes lors de la mise en oeuvre, les degrés de pré- et post-curage, etc.

Parmi les modes de production manuels, à savoir l’empilement et la pulvérisation, les propriétés mécaniques vont très fortement varier en fonction de la qualification

	σ [MPa]	E [GPa]
Empilement	62-344	4-31
Pulvérisation	124-335	6-12
RTM	138-193	3-10
Enroulement Filamentaire	550-1380	30-50
Pultrusion	275-1240	21-41

TABLE 2.5 – Propriétés mécaniques d’un composite de composition similaire selon différents modes de production[17]

de la main d’oeuvre et de l’habileté de celle-ci.

Concernant la production automatisée, les trois principaux procédés décrits dans le Chapitre 1 sont la pultrusion, l’enroulement filamentaire et le moulage par transfert de résine (RTM en anglais). Ces méthodes permettent de mieux gérer certains aspects cités plus haut et donc d’éviter d’éventuelles bulles d’air ou autre mauvais agencement des fibres.

Le Tableau 2.5 montre la différence de résistance et de rigidité d’un composite de même composition (même matrice et même type de fibres) en fonction du procédé de fabrication. Le pourcentage de fibres n’est pas contrôlé et est propre à chaque procédé.

2.2 Application des FRP aux Passerelles

L’histoire des ponts et des passerelles construites par l’homme a toujours été liée aux matériaux de construction disponibles. Ainsi, jusqu’à une certaine époque, la plupart des pont étaient construits en bois ou en maçonnerie. En effet, ces matériaux étaient les plus efficaces pour franchir des portées allant jusqu’à une quarantaine de mètres. Cependant, avec la révolution industrielle, l’acier s’est développé.

Ce nouveau matériau est rapidement entré sur le marché de la construction. C’est en 1779 que le premier pont en fonte fut construit au Pays de Galles, l’Iron Bridge. Suivi de près par d’autres prototypes, l’acier a démontré ses capacités et est alors devenu le matériau de référence pour la construction de ponts. Grâce aux possibilités que ce dernier offrait, assez vite les portées et le nombre de ponts ont explosé.

Bien que les FRP soient disponibles depuis plusieurs décennies et que les premiers prototypes semblent avoir fait leurs preuves, son utilisation ne s’est développée qu’au cours de ces dernières années car les impacts économiques liés à la corrosion des aciers ont explosé.

En effet, l’utilisation de sels de déneigement, l’augmentation des charges du trafic, le vieillissement des infrastructures ainsi que l’augmentation du coût de la main

d'oeuvre ont ouvert la porte à de nouvelles possibilités ayant une meilleure durabilité. Les FRP, déjà utilisés dans d'autres domaines, étant réputés pour leur résistance à la corrosion ont donc pu se développer.

2.2.1 Protection

Avant d'être utilisé comme matériau structurel à proprement parler, le FRP peut servir de protection anti-corrosion pour les ponts existants. Cela se fait au travers d'une couche de composite enrobant les éléments vulnérables à la corrosion sous le pont. Cette coque de composite possède une triple fonction : finition, entretien et protection.

Vu de l'extérieur, une coque en FRP apporte la touche finale à l'ouvrage par rapport aux poutres apparentes. Cette sous-structure peut également être utilisée comme accès au dessous du pont pour faciliter l'inspection et l'entretien sans devoir mobiliser d'autres moyens (grues, arrêt du trafic, bateau, ...).

Finalement, l'utilité principale de ce genre de construction est de protéger la structure principale des effets néfastes de son environnement sur sa sécurité. Un acier nu protégé par une coque aura ainsi un taux de corrosion plus de 10 fois plus faible qu'un acier peint à l'air libre.[19]

2.2.2 Rénovation et Réparation

Grâce à son rapport densité/résistance très faible, le FRP est un candidat de choix lors de la réparation ou du renforcement d'une structure. Sa légèreté le rend facilement manipulable et transportable dans des endroits étroits exigeant une main d'oeuvre exclusivement humaine. Ce fut notamment le cas au Kattenbusch Bridge en Allemagne durant les années 80. En effet, suite à l'apparition de fissures dans le béton, il a été déterminé que la durabilité des armatures n'était plus assurée. Pour y remédier, des plaques de FRP ont été fixées au droit de la faiblesse permettant au pont d'être toujours debout à l'heure actuelle.[20]

L'utilisation de FRP pour la rénovation des ponts est extrêmement efficace, simple à effectuer et rapide à mettre en oeuvre. Sa facilité de manipulation permettrait d'effectuer ces travaux sur un bon nombre de ponts et ainsi d'économiser plusieurs milliards d'euros annuellement en Europe et plus encore à travers le monde[21].

Un autre cas de figure rencontré couramment est celui du pont à renforcer afin de pouvoir reprendre des charges de trafic plus importantes, suite à l'augmentation des charges de poids lourds par exemple. Le trafic routier ayant évolué au cours des dernières décennies et les cas de charges d'il y a 50 ans ne sont plus les mêmes qu'aujourd'hui, de même que les normes de charges pour ces ouvrages [22].

Les problèmes rencontrés se trouvent souvent au niveau du tablier ou des colonnes.



FIGURE 2.5 – Colonnes renforcées à l’aide de fibres de carbone

Les colonnes peuvent assez facilement être renforcées à l’aide de fibres enroulées autour de celles-ci et fixées avec de la résine comme à la Figure 2.5. Dans le cas du tablier, un remplacement avec le même matériau et une plus grosse épaisseur engendrerait une augmentation des charges non négligeable pour les fondations. L’utilisation de FRP comme renforcement ou en remplacement intégral du tablier permet d’augmenter la résistance du tablier tout en diminuant sa masse et ainsi de limiter la surcharge des fondations.

2.2.3 Passerelles Piétonnes et Cyclistes

Tabliers

La première utilisation structurelle du FRP pour des passerelles a eu lieu pour un tablier. Il s’agit d’une petite passerelle à Charlottesville aux Etats-Unis qui a été construite en 1978[1]. Les tabliers étant souvent sujets à une fort détérioration, il est logique de voir apparaître des essais d’alternatives aux matériaux classiques. Les tabliers en FRP présentent l’avantage d’être légers (et donc simples à installer) en plus de posséder une bonne résistance aux attaques chimiques et à l’environnement. En raison des caractéristiques des FRP évoquées plus haut, le critère dimensionnant des tabliers est dans la plupart des cas la flèche admissible, c’est-à-dire un problème de rigidité, et non de résistance[16]. Pour cela, l’inertie est maximisée en éloignant les couches de fibres aux extrêmes haut et bas. Au centre se trouve un remplissage qui n’a pas forcément de bonnes propriétés mécaniques, son but étant juste de combler le vide entre les couches structurales et de reprendre le cisaillement. Cette configuration en panneaux sandwich permet de garder un produit léger tout en

éliminant au maximum le problème de rigidité. Un autre avantage des sandwichs est que cette *âme de poutre* large offre une meilleure résistance torsionnelle comparé à une poutre en "I" classique.[15]

L'intérieur de ces panneaux est soit composé de blocs de mousse expansée, soit d'une structure en nid d'abeille à base d'aluminium, de polycarbonate ou d'aramide.[15]

Câbles

En 1980, dans le but de trouver des alternatives à l'acier comme matériau pour les câbles de précontrainte, une passerelle à Dusseldorf a été construite avec des câbles en FRP. Les 12 armatures en fibre de verre ont été monitorées pendant 5 ans avant que la passerelle ne soit démantelée afin d'étudier le vieillissement des câbles. Elle a été remplacée par une passerelle de même type, les armatures ayant été améliorées suite aux résultats de la précédente.[23]



FIGURE 2.6 – Passerelle de Lunen'sche Gasse à Dusseldorf [24]

Même si ces câbles de précontrainte ont été utilisés en association avec du béton et non dans des passerelles totalement composées de FRP, il est assez simple d'imaginer les autres possibilités qu'offrent les FRP dans ce domaine. La résistance à la corrosion est le principal défaut des câbles en acier et l'un des points forts majeurs du FRP.

Un autre avantage des câbles en FRP est leur ratio résistance/densité élevé. En effet, au-delà d'une certaine portée (environ 5km), les câbles en acier sont limités car ils n'arrivent plus à porter leur propre poids. Si les fibres pouvaient être utilisées à leur potentiel maximal, cette portée limite atteindrait 10km[25].

Ces câbles sont généralement composés de fibres d'aramide ou de carbone couplées à une matrice à base d'époxy. Les fibres de verre sont moins utilisées étant donné leur tendance au fluage.[26]



FIGURE 2.7 – Exemple de câbles en FRP [23]

Poutres

Au début des années 80, la pultrusion de profilés composites se développe. Cette méthode permet de produire des FRP à un coût acceptable. Le matériau est alors utilisé comme du *black metal*. Cependant, cette méthode de production a des limites car en utilisant un design copié tout droit des poutres métalliques pour ce nouveau matériau, les qualités ne sont pas vraiment optimisées et la complexité liée à l'anisotropie se fait ressentir. Cette copie de l'acier, certes plus légère et résistante à la corrosion, est aussi moins ductile et essentiellement unidirectionnelle dans ses propriétés.

Les profilés pultrudés offrent donc une valeur ajoutée limitée par rapport à l'acier. Ces éléments permettront néanmoins un premier essor du FRP dans la construction. Ils prouveront les qualités d'un matériau dans sa version low-cost (essentiellement en fibre de verre avec polyester), laissant imaginer le potentiel de versions plus perfectionnées du FRP.

Passerelles complètes

Tout naturellement, après le développement de divers éléments structuraux, les premiers ponts et passerelles entièrement en composite n'ont pas tardé à voir le jour. C'est ainsi qu'en 1982 sont construits les deux premiers ouvrages du genre, l'un en Chine et l'autre en Bulgarie. Bien qu'ayant des portées assez limitées (une dizaine de mètres) et des designs moins élancés que ce que l'on peut trouver à l'heure actuelle, ces pionniers sont déjà capables de répondre à un cahier des charges exigeant. Le pont de Ginzi (Figure 2.8) est un pont d'autoroute supportant quotidiennement un trafic routier soutenu.



FIGURE 2.8 – Pont de Ginzi, Bulgarie : un des premiers ponts entièrement en composite[27]

Par la suite, les passerelles entièrement en FRP ont commencé à apparaître petit à petit. Les profilés pultrudés sont largement utilisés car ils permettent un coût acceptable comparé aux matériaux classiques. Dans la plupart des cas, ils font partie d'un treillis porteur qui servira également de garde-corps comme pour la passerelle en Figure 2.9.

Malgré une connotation *black metal*, ces passerelles ont l'avantage d'être plus durables dans le temps car elles nécessitent moins d'entretien que leurs homologues en



FIGURE 2.9 – Passerelle d’Audubon Canyon Ranch[28]

acier ou béton. Leur légèreté permet aussi une installation souvent moins laborieuse et moins coûteuse.

Ce n’est que vers les années 90 que des passerelles plus ambitieuses ont vu le jour. Un bel exemple est celui du golf d’Aberfeldy en Ecosse (Figure 2.10) : une passerelle piétonne de 2m de large enjambant une rivière sur une portée maximale de 63m pour une longueur totale de 113m. Cette prouesse technique et architecturale est entièrement composée de FRP, du tablier aux câbles en passant par les haubans.



(a) Vue d’ensemble[29]



(b) Dessous du tablier[30]

FIGURE 2.10 – Passerelle du golf d’Aberfeldy, Ecosse

Elle a vu le jour grâce à des étudiants de l’Université de Dundee sur demande du golf souhaitant une extension. Ils ont rapidement été limités dans le choix des matériaux étant donné que tous les éléments de la structure devaient être transportables et assemblables sans l’aide de grues. La solution choisie a été d’utiliser des ACCS (Advanced Composites Component System) soient des panneaux préfabriqués assemblés par emboîtement fournis par Maunsel Structural Plastics.[30] Ces panneaux constitués de fibre de verre alliée à une matrice polyester isophtalique et

les câbles à base d'aramide permettent une production à faible coût. Le système d'emboîtement via des rainures et à l'aide de colle epoxy permet une optimisation du matériau tout en le rendant facilement transportable et assemblable.[17]

Malgré une approche très expérimentale, l'équipe a su installer cette passerelle "à la main" avec pour seule aide des engins agricoles. Le coût total ainsi que le comportement de cette passerelle sont similaires à ce qu'une solution en acier aurait donné. Mais le poids d'une solution en acier n'aurait pas permis un transport aussi facile et une mise en place par une équipe non qualifiée.[31]



FIGURE 2.11 – Le Tech 21 Bridge transporté par un chariot élévateur[32]

Tabliers Porteurs

La diversification de l'utilisation des différents modes de production dans la construction continue alors en utilisant de plus en plus les propriétés des FRP. C'est notamment le cas en 1997 avec le "Tech 21 Bridge" aux Etats-Unis qui est composé de poutres-caissons façonnées à la main comme l'illustre la Figure 2.11.[32]

L'utilisation de la combinaison fibre de verre-polyester reste toujours la plus courante, tandis que les méthodes semi-automatiques prennent de plus en plus

d'ampleur. En effet, afin d'optimiser l'utilisation des propriétés anisotropes des FRP, un empilement manuel des couches autour d'un noyau en mousse est souvent combiné à une injection de résine et un durcissement sous vide.

C'est notamment le cas chez FiberCore, un des leaders Européens en matière de structures en FRP. Leur technologie InfraCore Inside est un mélange entre un panneau sandwich et une ossature de poutres. Ils utilisent un empilement de plis en "Z" les uns à côté des autres, les semelles. Les âmes sont quant à elles séparées par des blocs de mousse éloignant les semelles de l'axe neutre et donnant ainsi l'inertie nécessaire. La Figure 2.12 montre bien l'agencement des différentes couches.

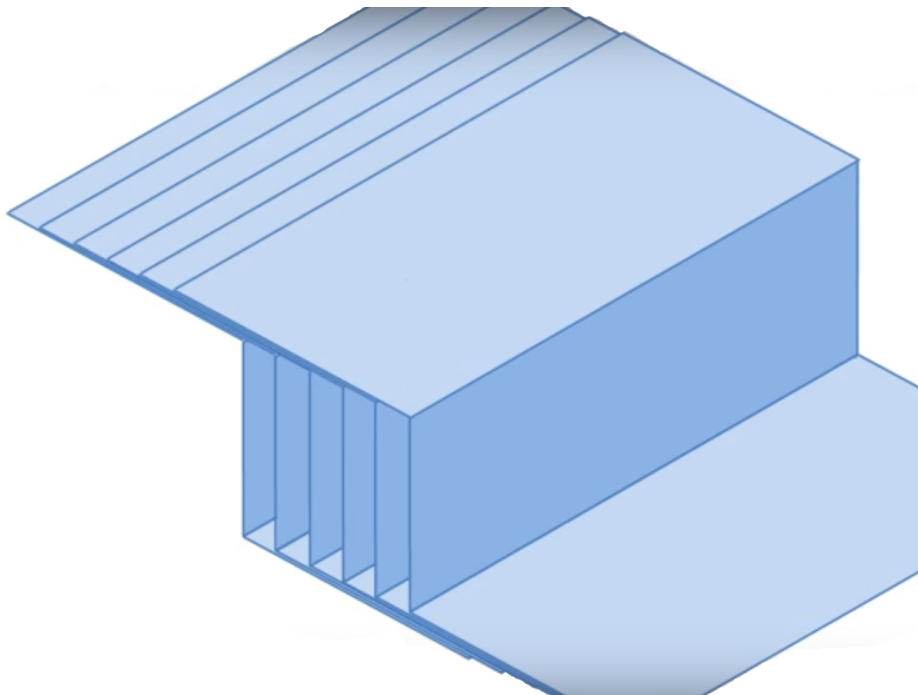


FIGURE 2.12 – Schéma de la technologie InfraCore Inside

Ces caissons permettent de réaliser des passerelles autoportantes durables et à l'installation aisée. La fabrication d'une passerelle dure environ 4 semaines durant lesquelles les blocs de mousse (polyuréthane, PVC ou autre) sont découpés, en blocs, à la hauteur et largeur requise. Ces tranches sont ensuite coupées tous les 1m27 (50pouces) pour que des tissus de fibre de verre y soient collés. Ces blocs sont placés côte à côte dans l'alignement de la portée, la ligne suivante étant placée en quinconce et ainsi de suite sur toute la largeur. Une fois les blocs placés et les tissus déroulés, l'injection sous vide de la résine peut commencer.

L'ensemble de la structure est donc mis sous vide et les injections et extractions de résine sont réparties sur toute la surface. Cette opération est faite directement sur

le moule qui sert simplement à donner sa courbure à la passerelle.

Lorsque l'ensemble de la structure est imbibée de manière homogène, on attend le durcissement de la matrice avant d'effectuer les étapes de finition (découpe des bords, peinture, revêtement, appuis et garde-corps).

2.2.4 Avantages et Inconvénients

Avantages

Comme évoqué au point 1.5, l'un des principaux avantages des FRP dans le domaine des passerelles est son excellent rapport résistance/poids. Il est en effet bien supérieur aux matériaux classiques comme l'acier, le béton ou même le bois (cfr Tableau 1.1).

Cela signifie que d'un point de vue théorique basé purement sur la résistance, un ouvrage en FRP pourrait supporter son poids propre sur une portée plus importante que le même ouvrage en acier.

De ce faible poids propre ainsi que de la forte possibilité de préfabrication découle une autre caractéristique intéressante pour une passerelle piétonne : la facilité de mise en oeuvre. En effet, cela simplifie des tâches comme le transport de la structure, l'installation et permet donc d'en réduire les coûts et l'impact sur les environs (interruption du trafic, travaux lourds,...)

Un dernier avantage non négligeable est la durabilité potentielle d'une passerelle en FRP. Même si le recul ne permet pas de certifier avec des exemples réels que c'est le cas, les estimations portent à croire qu'un tel ouvrage pourrait durer jusqu'à 100 ans, et ce en demandant peu d'entretien.

Ces espérances sont basées sur le fait que les FRP ne craignent pas l'humidité et l'oxydation comme l'acier et sont globalement moins sensibles aux agressions chimiques que le béton. En y ajoutant un entretien sommaire tel que de la peinture lorsque la couche initiale s'écaille et quelques réparations ponctuelle là où les fibres se délamineraient, la durée de vie théorique d'une passerelle en FRP dépasse largement celle du même ouvrage en matériaux classiques.

Inconvénients

Le coût initial élevé des passerelles en FRP est souvent mis en avant comme leur principal défaut qu'il faut cependant pouvoir nuancer. Le coût initial de la structure d'une passerelle en FRP est effectivement sensiblement plus élevé qu'une homologue en acier par exemple.

Cependant, une hausse de la durée de vie permettra d'amortir cet investissement sur un laps de temps plus long et ainsi devenir moins onéreux qu'une passerelle

classique. De plus, des économies sont aussi faites au niveau de la mise en oeuvre comme décrit plus haut ainsi que dans la minimisation des fondations et de leurs travaux.

A l'heure actuelle, un problème récurrent lors du dimensionnement de telles passerelles est son comportement dynamique. Leur faible masse et leur rigidité en font généralement des passerelles facilement excitables sur les fréquences provoquées par les pas de piétons. Une étude supplémentaire doit alors être menée afin de garantir le confort des usagers via le sur-dimensionnement ou l'utilisation d'amortisseurs.

A nos yeux, le principal défaut des FRP appliqués aux passerelles est le manque d'expériences. En effet, c'est un matériau encore méconnu du grand public qui se raccroche plus facilement aux innombrables ouvrages connus en acier ou en béton. Même si des normes de construction plus internationales se précisent, le choix final de la solution construite revient souvent aux mains d'une autorité qui n'est pas toujours spécialiste en la matière. Celle-ci se montrera donc souvent sceptique par rapport à ce matériau nouveau. Il faudra du temps au FRP pour se faire une place dans le milieu des passerelles mais cela ne saurait tarder.

2.3 Ouvrages Existants

Il existe à l'heure actuelle un certain nombre de passerelles en FRP à travers le monde. Nous avons référencé un maximum d'ouvrages entièrement constitués de composites. Notre objectif est d'analyser les différents systèmes statiques utilisés, les composants et leur mode de production ainsi que les portées franchissables.

Nous avons restreint nos recherches aux passerelles piétonnes et cyclistes, certaines d'entre elles étant également conçues pour supporter un véhicule de service ou d'urgence le cas échéant. Nous n'avons pas pris compte les nombreuses passerelles utilisant les FRP pour une seule application comme le tablier, les câbles ou quelques profilés pultrudés que nous n'avons pas jugé pertinents.

2.3.1 Portées

Lors de la conception d'une passerelle, la portée à franchir avec la combinaison système statique - matériau est déterminante pour le choix de la solution qui sera mise en oeuvre. En effet, lors de la conception, certaines de ces combinaisons ne pourront pas être retenues car elles ne permettent pas de franchir la portée requise. Il n'est bien souvent pas possible de rajouter un appui intermédiaire, ou alors le coût supplémentaire que cela engendrerait serait trop important. Dans d'autres cas, elles seront écartées car les solutions de plus longue portée affecteront moins

l'environnement de la passerelle, tant au niveau de l'implantation des appuis que du paysage général.

Pour que le FRP ait de l'avenir dans la construction de passerelles, il faut donc qu'il ait une certaine capacité de franchissement. A l'heure actuelle, comme le montre la figure 2.13, la plupart des passerelles en FRP sont caractérisées par des portées entre 10m et 25m. Ces passerelles sont les plus courantes car elles ont souvent un design assez simple et économique, mais nous noterons que des portées plus importantes, jusqu'à 70m, existent déjà.

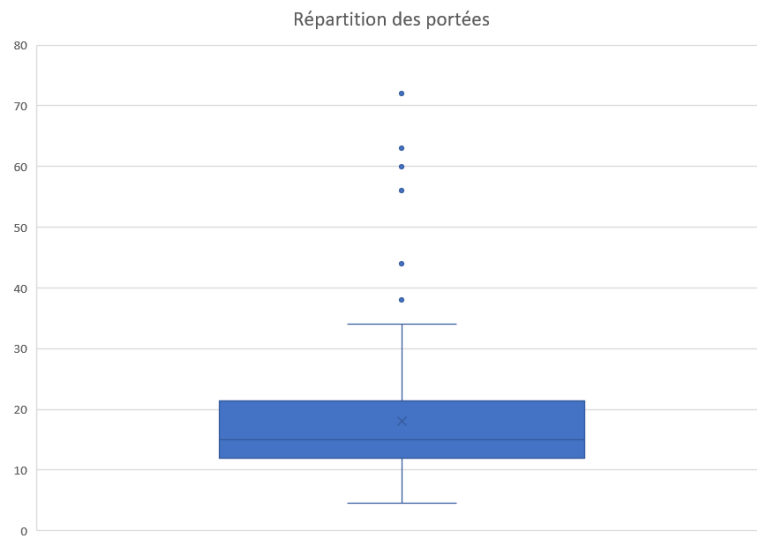


FIGURE 2.13 – Spectre de répartition des portées des passerelles répertoriées

En ce qui concerne les passerelles en un seul morceau, qui ont l'avantage de pouvoir être installées en un laps de temps très court, la portée dépasse déjà les 40m grâce à une conception particulière évoquée au point sur les systèmes porteurs (2.3.4).

2.3.2 Localisation

Il existe des centaines de passerelles entièrement réalisées en FRP dans le monde. Nous sommes conscients d'en avoir négligées quelques unes car redondantes et de ne pas avoir pu référencer chaque passerelle. Cependant, nos recherches nous amènent déjà à déceler des tendances en terme de répartition de ces passerelles dans le monde.

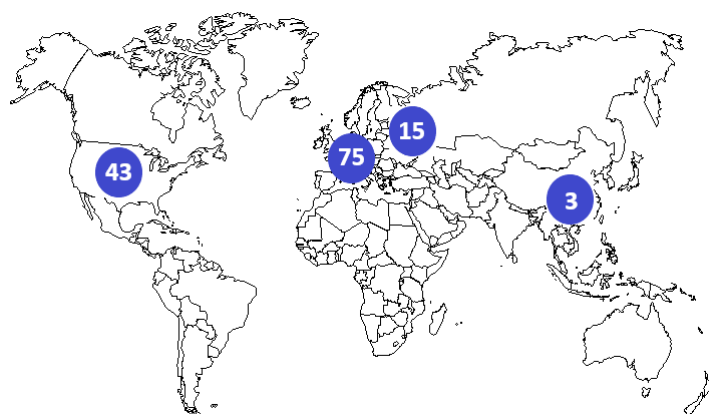


FIGURE 2.14 – Répartition géographique des ouvrages répertoriés dans le monde

Comme nous pouvions nous y attendre, ce genre d'ouvrage n'existe que dans les pays développés industriellement. La majorité d'entre elles se trouve en Europe, suivi par les Etats-Unis, la Russie et la Chine (Figure 2.14). Dans ces deux derniers pays, il est plus difficile d'obtenir des informations. La majorité de ces structures aux Etats-Unis est dû à la société ET Techtonics, un des leaders mondiaux qui y est basé et cela permet un référencement relativement simple.

En Europe, l'abondance de passerelles en FRP est principalement due à deux sociétés : Fiberline et FiberCore Europe. La première est danoise et est active dans plusieurs domaines FRP, dont celui de la construction. La seconde est néerlandaise et est exclusivement axée sur le FRP des ponts, passerelles et portes d'écluses avec un total de plusieurs centaines d'ouvrages. Ces deux sociétés ont contribué au développement des passerelles en FRP dans leur pays respectif, mais également en dehors en faisant connaître le matériau et en le popularisant ou simplement en exportant des passerelles vers les pays voisins (Figure 2.15).

2.3.3 Matériaux

Comme nous pouvons le constater dans la Figure 2.16, les passerelles en FRP sont majoritairement composées de fibres de verre (de type E) combinées à une résine polyester. C'est le cas de plus de la moitié des passerelles référencées auxquelles nous pouvons rajouter celles constituées de la technologie InfraCore Inside. En effet, même si cette technique inclut parfois des plis en fibres de carbone, en pratique elle n'est que très rarement nécessaire et appliquée. Cela porte donc le pourcentage de passerelles en FRP Verre+Polyester à plus de 95% des ouvrages référencés.

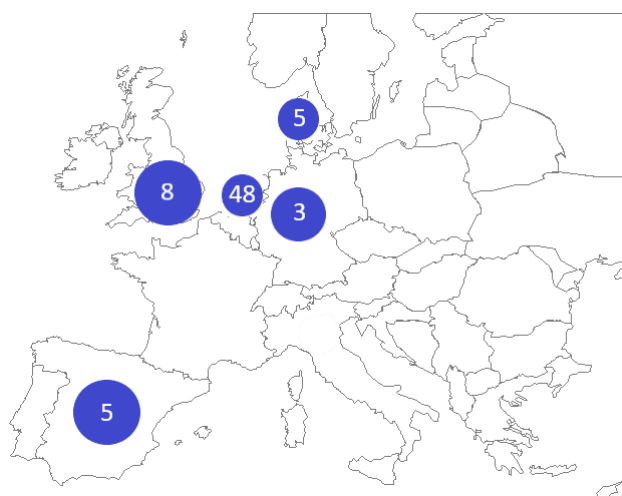


FIGURE 2.15 – Répartition des ouvrages répertoriés en Europe par pays

Cette distribution s'explique par le fait que cette combinaison est la plus économique. C'est le principal critère de choix des fabricants qui doivent se présenter de manière compétitive sur le marché pour faire face aux matériaux traditionnels.

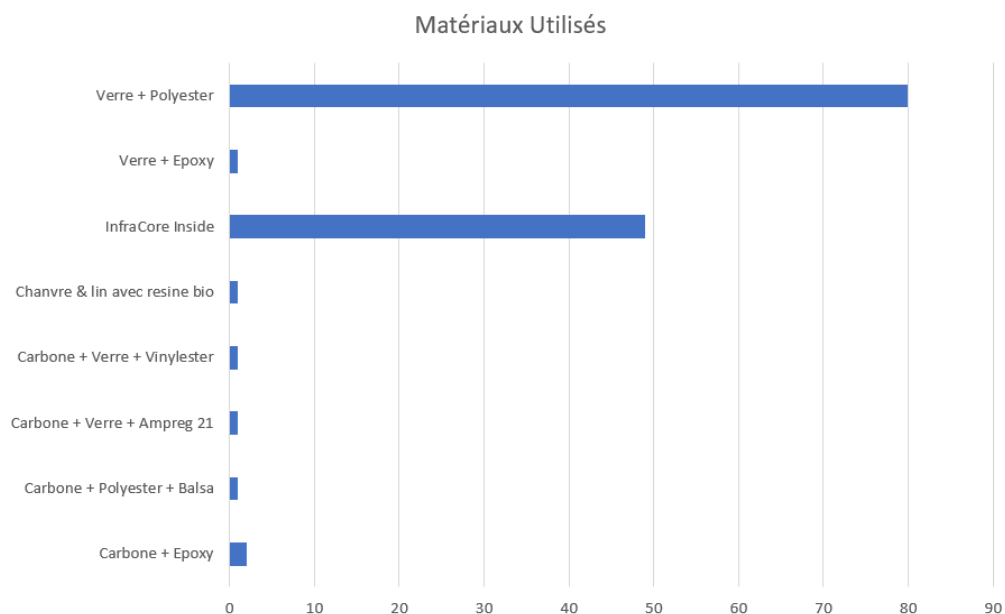


FIGURE 2.16 – Répartition des matériaux utilisés dans notre répertoire de passerelles

Les passerelles qui utilisent d'autres combinaisons ne sont d'ailleurs, pour la plupart, pas produite par des entreprises mais plutôt par des universités ou autres organisations liées à la recherche.

Dans ces cas particuliers, les fibres de carbone sont bien souvent utilisées pour leurs propriétés mécaniques supérieures. Elles peuvent être utilisées seules avec une résine époxy, ou être combinées à la fibre de verre et augmenter la rigidité du mélange. Lorsque ces deux types de fibres sont mélangées au sein d'un même FRP, un problème de compatibilité des résines se pose. Ce problème exclut les époxy et polyesters classiques. Pour palier à cela, le fabricant Strongwell utilise une résine vinylester alors que l'entreprise Gurit a préféré fabriquer sa résine spéciale à base d'époxy : l'Ampreg 21.

Plus récemment, les universités de Delft et d'Eindhoven ont réalisé une passerelle bio-sourcée. Les fibres utilisées sont du chanvre et du lin, alors que la résine est d'origine biologique. Cette passerelle atteint une portée de 14 mètres d'un seul bloc. Elle a été produite par injection sous vide comme la moitié des passerelles référencées. L'autre moitié des passerelles est constituée de profils pultrudés.

2.3.4 Systèmes statiques

Une passerelle, peu importe le matériau utilisé, est caractérisé par son système porteur. Nous avons donc regroupé les différentes passerelles référencées en groupes selon ce critère.

Une fois de plus, le critère principal que nous avons voulu mettre en évidence est la portée et ce en fonction du système statique. Les données se trouvent résumées dans le Tableau 2.6.

Système statique	Intervalle de portée	Nombre de passerelles	Exemple type
Arc	20-56	3	Ooypoort
Bowstring	38	1	Lleida Pedelta
Cables	72	1	Cuenca
Caisson	9-56	5	Frederikstad
Deck	5-34	55	Wetering heerde
Haubanné	11-63	4	Fiberline
Poutres porteuses	5-23	12	Anna Pauwlona
Treillis	8-30	50	Pontresina
Treillis cage	25-31	2	Kuskovo
U-Shape	12-44	3	Almunecar

TABLE 2.6 – Synthèse des ouvrages existants cfr Annexe A

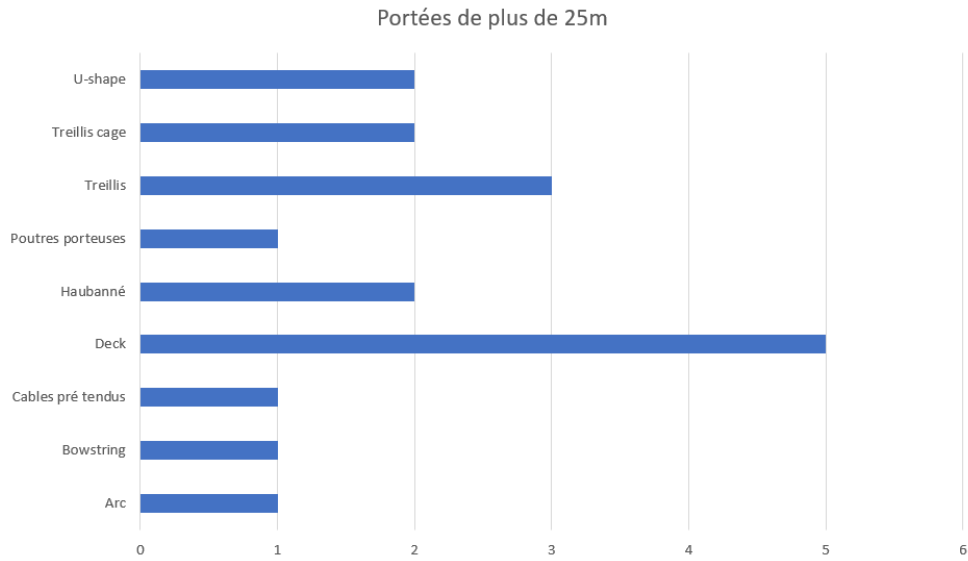


FIGURE 2.17 – Occurrences des systèmes statiques de passerelles de plus de 25m

Nous avons répertorié dans la catégorie câbles une passerelle qui utilise des câbles ancrés à chaque extrémité pour simplement soutenir le tablier. Cette ingénieuse technique permet de franchir une portée de 72m, soit la plus longue que nous avons rencontrée dans nos recherches.

La catégorie des caissons regroupe les passerelles dont le tablier porteur est une large section creuse et fermée. Ce système procure une forte inertie à la section en gardant une faible masse, nous trouvés une avec une portée de 56m.

La principale différence avec la catégorie des *decks*, où les tabliers sont également porteurs se situe dans la section. Contrairement aux caissons, ceux-ci ne sont pas creux mais bien une section pleine où le noyau est souvent composé de mousse ou de cellules en nid d'abeille. Cela permet de garder une allure élancée tout en franchissant des portées allant jusqu'à 34m actuellement.

Nous avons également divisé les treillis en deux parties, à savoir : les treillis simples et les treillis cages. Là où les treillis simples utiliseront leur structure latérale afin de jouer le garde-corps, les treillis cage seront plutôt apparentés à des tunnels dont les faces latérales mais aussi inférieures et supérieures sont en treillis. Les portées maximales sont semblables (environ 30m) mais les portées minimales sont sensiblement différentes, respectivement 8m pour les treillis simples et 25m pour les treillis cages.

2.3.5 Exemples Types

Arcs

Dans la catégorie des arcs, nous avons rassemblé les passerelles voûtées s'apparentant à une forme funiculaire afin de travailler presque exclusivement en compression. Même s'il n'a rien de nouveau, ce système ingénieux permet de franchir de belles portées allant pour l'instant jusqu'à $56m$ comme à Ooypoort aux Pays-Bas (Figure 2.18).

Cette passerelle de 2014 est réalisée par injection sous vide de fibre de verre de type E avec une résine polyester. Pour le transport, elle a été réalisée en 3 pièces avant d'être assemblée sur place. Elle a été conçue pour résister aux inondations fréquentes étant donné qu'elle se trouve dans une zone marécageuse à l'entrée d'une réserve naturelle. En cas d'inondation trop importante, elle peut même être complètement démontée et mise en sécurité.



FIGURE 2.18 – Passerelle de Ooypoort

Bowstring

Il existe une passerelle utilisant un système bowstring avec une portée de $38m$. Un bowstring permet de reprendre les réactions horizontales d'un arc classique dans le tablier, évitant ainsi de les transmettre aux fondations.

Cet ouvrage de 2004 est situé à Lleida en Espagne. Il a été réalisé à l'aide de profilés pultrudés (Fibres de verre-E + Polyester) assemblés par emboîtement afin de former de plus grosses sections. Celles-ci ont ensuite été assemblées pour donner naissance à la structure en Figure 2.19.



FIGURE 2.19 – Passerelle de Lleida Pedelta

Câbles

La passerelle illustrée à la Figure 2.20 n'est pas entièrement réalisée en FRP mais nous avons voulu l'intégrer à notre travail pour son système statique particulier. Comme mentionné plus haut, des câbles en FRP (carbone/époxy) sont tendus au dessus du vide et fixés aux butées. Ils reposent sur deux points d'appuis intermédiaires pour franchir une longueur totale de $216m$ en trois portées identiques de $72m$.

Une dalle de béton de $25cm$ d'épaisseur est ensuite posée sur les câbles ainsi que des sacs de sable pour simuler une charge de 60% de la capacité de la passerelle. Les différents joints sont alors réalisés dans cet état là afin de figer la passerelle dans sa position finale *précontrainte*.

Cette passerelle construite à Cuenca (Espagne) en 2011 illustre les possibilités variées des FRP dans le domaine de la construction.



FIGURE 2.20 – Passerelle de Cuenca

Caisson

A Fredrikstad en Norvège, la passerelle visible à la Figure 2.21 a vu le jour en 2003. Les deux parties de 28m de long sont mobiles pour permettre le trafic maritime. C'est possible grâce aux pistons et surtout au faible poids propre de la structure.

Sa construction en fibres de carbone couplées à une résine polyester injectée sous vide lui procure une excellente résistance tandis que l'inertie qu'offre la section en caisson assure la rigidité de l'ouvrage, lui permettant ainsi de franchir une telle portée.



FIGURE 2.21 – Passerelle de Fredrikstad

Deck

Dans cette catégorie nous retrouvons un grand nombre d'ouvrages (55 répertoriés). C'est dû en partie au grand nombre de passerelles produites et référencées par FiberCore Europe. La technologie utilisée par cette entreprise est expliquée au point 2.2.3 permet d'obtenir une passerelle élancée avec un faible impact sur le paysage, comme nous pouvons l'observer à la Figure 2.22.

Ce type de technologie n'est pas la seule à permettre de construire des passerelle rentrant dans cette catégorie. Des panneaux sandwichs peuvent aussi être utilisés, le noyau de ces panneaux structuraux peuvent alors être de la mousse ou une structure en nid d'abeilles faite de polypropylène, d'aluminium ou encore d'aramide.



FIGURE 2.22 – Passerelle de Grote Wetering

Haubané

Le *Fiberline Bridge* au Danemark est une des trois passerelles haubannées entièrement en FRP que nous avons référencé. Elle est divisée en deux portées de respectivement 27 et 13m avec un mât central. Chaque pièce est réalisée en fibre de verre avec résine polyester pultrudée et assemblée.

Bien qu'agé de plus de 20 ans (1997), l'ouvrage répond toujours aux critères actuels de déformation et de résistance avec une flèche limitée à $l/200$ et une capacité de chargement de $5kN/m^2$ auquel vient s'ajouter un éventuel véhicule de service.



FIGURE 2.23 – Fiberline Bridge

Poutres porteuses

Le système statique le plus trivial est celui des poutres porteuses. Comme à la Figure 2.24, des poutres sont posées sur leurs appuis et un tablier est ensuite posé afin d'en faire une passerelle. Nous avons ici affaire à des sections pultrudées en

fibre de verre et résine polyester.

Ces sections sont assemblées pour créer des poutres de $23m$ de long. Lorsqu'elles sont suffisamment nombreuses (dans cet exemple 3 poutres pour les $2m$ de largeur), elles permettent un excellent comportement de la passerelle dont la flèche est alors limitée à $l/400$ pour un chargement de $5kN/m^2$.



FIGURE 2.24 – Anna Paulowna Bridge

Treillis

Il existe un nombre important de passerelles en FRP portées par des treillis latéraux, faisant souvent office de garde-corps par la même occasion. C'est notamment le cas à Pontresina en Suisse où la passerelle (Figure 2.25) utilise des profilés pultrudés Verre-Polyester.

Le treillis permet de franchir deux portées de $12.5m$, une moitié ayant des assemblages collés et l'autre ayant des assemblages boulonnés.

Le faible poids de l'ouvrage permet de l'héliporter chaque printemps afin d'éviter les éventuels dégâts dus à la fonte des neiges ainsi que de monitorer l'évolution de la passerelle et le comportement des deux types d'assemblages.



FIGURE 2.25 – Passerelle de Pontresina

Treillis cage

Selon le même principe que la catégorie précédente, ce système statique utilise des treillis pour franchir une grande portée. Deux exemples sont répertoriés en Russie, en profilés pultrudés Verre-Polyester.

La différence majeure est que la section de la passerelle est fermée au dessus par un dernier treillis, ressemblant alors à un tunnel. Ces passerelles sont facilement manipulables et conviennent parfaitement à des ouvrages temporaires longue portée comme celle de Kuskovo visible à la Figure 2.26.



FIGURE 2.26 – Passerelle de Kuskovo

U-Shape

Les passerelles en forme de "U" sont similaires aux treillis simples en ce sens qu'elles utilisent le garde-corps comme partie porteuse de la structure. Bien sûr, ces garde-corps ne sont ici plus de treillis mais souvent des murs pleins réalisés par injection.

La passerelle de la Figure 2.27 utilise ainsi une combinaison de fibre de carbone et de résine époxy pour le bac principal ainsi que pour les renforts en "U" tout au long de la passerelle. Cela permet à l'ouvrage de franchir les 44m de vide au-dessus de la rivière.



FIGURE 2.27 – Passerelle d'Almunecar

2.3.6 Bilan

Nous avons pu observer qu'il existe, comme pour les autres matériaux de construction, un grand nombre de systèmes statiques permettant de franchir des portées conséquentes en répondant au cahier des charges de l'ingénieur mais aussi de l'architecte.

Chaque catégorie utilisera les propriétés des FRP à sa manière, qu'il s'agisse du mode de production ou des matériaux utilisés, et chacune de ces passerelles permet de faire évoluer et d'améliorer le nombre important de variables liées à l'utilisation

des FRP dans ce domaine.

Notre sentiment est que, dans le domaine des passerelles piétonnes, les limites ne sont pas technologiques, financières ou autre, mais plutôt une question de demande. Il est en effet très rare de construire des passerelles piétonnes devant franchir une portée de plusieurs centaines de mètres. Dans les quelques cas concernés, l'option des appuis intermédiaires est bien souvent privilégiée pour garder un aspect élancé de l'ouvrage, et ce quel que soit le matériau.

Dans la plupart des cas, les performances des FRP seront donc suffisantes pour répondre à un cahier des charges classique de passerelle piétonne.

Chapitre 3

Analyse des Normes de Calcul Existantes

Dans ce chapitre, nous allons comparer point par point quatre différents documents pouvant servir de guide au dimensionnement d'une structure de type passerelle construite en FRP. L'objectif de ce chapitre n'est néanmoins pas de reprendre de manière exhaustive toutes les informations présentes dans les différents guides analysés. Nous allons ci-après seulement les comparer sur certains points qui ont retenu notre attention suite aux recherches et à l'approche que nous avons pu faire par rapport à l'utilisation des FRP dans le domaine du génie civil. Pour une application correcte des normes et recommandations de ces guides, il faudra toujours se référer au guide original et non se contenter de cette retranscription comparative. En effet, toutes les hypothèses et conditions d'application des calculs ne sont pas reprises afin de ne pas surcharger ce chapitre.

3.1 Origine et Domaine d'Application

	CUR96	JRC prospect	US guideline	Fiberline guideline
Pays d'origine	Pays-Bas	Europe	USA	Danemark
Publication Révision	2003 2017	2016 /	2006 2011	2003 /
Types de matériaux admis	fibres carbone ou verre et résine thermodule	résine thermodule	fibre de verre-E et résine de polyester	fibre de verre et résine de polyester
Limitation des matériaux	min. 15% de fibres et 12.5% des fibres dans chaque direction	min. 15% de fibres	valeurs minimales de résistances requises	uniquement les produit de Fiberline
Mise en oeuvre	Non précisée	Pulvérisation non admise	Uniquement des profilés	Uniquement des profilés

CUR96

Le CUR96 est un document produit par les Pays-Bas en 2003 pour sa première édition et dont la dernière révision date de 2017. Ce guide est disponible en néerlandais ainsi qu'en anglais.

Il est précisé que ce document ne s'applique que pour des matériaux composites avec un pourcentage de fibres supérieur à 15% et les calculs développées nécessitent au moins 12.5% des fibres dans chaque direction principale (0, 90, +45 et -45 degré). La nature des fibres et de la résine est aussi précisée, à savoir que les recommandations sont valables pour des fibres de verre et des fibres de carbone de type HS, HT, IM et HM tandis que la résine doit être thermodule de polyester insaturé, vinylester ou epoxy. Les fibres d'aramide (kevlar) ne sont donc pas couvertes par ce document. De même, les structures où les micro-fissures ne sont pas permises (réservoirs, ...) ne peuvent pas être calculées à l'aide de ce document. Pour finir, ce document ne s'applique pas non plus aux barres de renforcement, aux cables ou à tout autre matériau composite utilisé dans le renforcement d'une structure existante.

JRC Prospect

Ce document qui a pour titre *Prospect for New Guidance in the Design of FRP* a pour fonction de précéder et donner les bases d'un futur Eurocode. Il a été publié en 2016 par le comité Européen pour la standardisation en charge des Eurocodes structuraux (CEN TC 250) qui lui a donné la référence N1431.

Comme le CUR96, le pourcentage de fibres des FRP couverts par ce document doit être au moins de 15% et la résine de type thermodure. Les structures couvertes doivent être des profilés, des plats, des coques ou des panneaux sandwich. Ces éléments doivent permettre des micro-fissures. Les câbles et barres de renforcement sont exclus.

Les modes de fabrication couverts sont aussi précisés et toutes les méthodes décrites dans le chapitre 1 sont couvertes à l'exclusion de la pulvérisation.

US guideline

Ce guide est spécifique aux passerelles piétonnes en FRP et a été produit en coopération par plusieurs organismes des Etats-Unis d'Amérique, à savoir le département des transports, le programme de technologie et développement, l'administration fédérale des autoroutes, le département de l'agriculture et le service des forêts. Son intitulé original est *A guide to fiber-reinforced polymer trail bridges*. Ce document a été publié en juillet 2006 et révisé en mai 2011.

Les matériaux couverts par ce guide pour la construction de passerelles composites sont limités à la fibre de verre de type E et à la résine de polyester.

Ce guide présente exclusivement des éléments de type profilés. Nous en concluons qu'aucun autre élément structuel FRP n'est couvert.

Fiberline Guideline

Ce guide d'utilisation des FRP est publié par l'entreprise Danoise Fiberline, un leader du marché des composites pultrudés. Il date de 2003 dans sa dernière version publiée en anglais.

Fiberline ne produit que des FRP pultrudés, dès lors ce guide s'applique à ce type de produits. Les profilés de Fiberline sont constitués de fibre de verre ainsi que de résine de polyester ou de vinylester et systématiquement enduits d'un voile de recouvrement pour une résistance optimale à la corrosion et aux aléas météorologiques. La proportion de fibres tourne toujours autour de 60% de la masse, ces fibres sont présentes sous forme de fibres longitudinales, de tapis continus et de matelassages complexes afin de garantir des résistances tant longitudinales que dans les autres directions.

Fiberline précise que les informations du guide sont valables uniquement pour leurs produits.

3.2 Détermination des Valeurs Caractéristiques

CUR96	JRC prospect	US guideline	Fiberline guideline
Valeurs pour une caractérisation quasi exhaustive de multiples éléments en composites	Copie intégralement le CUR96 en le citant	Valeurs seuils de $f_{y,t}$, $f_{y,c}$, E et G , les valeurs utilisées doivent être données par les fournisseurs	Valeurs nécessaires caractérisant tous les profilés de Fiberline

CUR96

Le chapitre 3 de ce guide fournit une vue complète et détaillée d'une majorité des valeurs caractéristiques des FRP qui pourraient s'avérer utiles. Au delà des valeurs caractéristiques pour les éléments séparés, de nombreux tableaux reprennent les valeurs de rigidité, de résistance, d'allongement à la rupture, de coefficient de poisson, de conductivité thermique, etc., en fonction des types de fibres, des types de résines et du pourcentage en volume de fibres de ces éléments.

JRC Prospect

L'annexe B du document en question fournit des tableaux de valeurs caractéristiques pour le design préliminaire. La référence citée renvoie vers le guide Néerlandais CUR96 de 2003. Tous les tableaux de valeurs ainsi que les commentaires qui les accompagnent sont tirés de ce document.

US guideline

Des valeurs minimales sont données pour les caractéristiques des matériaux.

- $f_{y,t} = 227$ MPa (33 000 psi)
- $f_{y,c} = 227$ MPa (33 000 psi)
- $G = 31$ MPa (4 500 psi)
- $E = 19.3$ GPa (2 800 000 psi)

N'ayant pas d'autres informations à propos de valeurs chiffrées sur les caractéristiques des FRP dans ce document, nous supposons que les données des caractéristiques nominales de résistance et de rigidité doivent être issues des données des fabricants où les profilés seront acquis.

Fiberline guideline

Un tableau des valeurs typiques de résistance et rigidité est donné dans le document. De même que pour les données du CUR96, ces valeurs sont nominales et non divisées par γ_M ou tout autre coefficient de sécurité. Les profils de Fiberline semblent avoir des propriétés régulières. En effet, que ce soit des profilés en I, en U, des cornières ou des sections creuses, les mêmes valeurs de résistances seront utilisées. Parmi celles-ci, quelques valeurs représentatives sont reprises dans le Tableau 3.1

Résistance en flexion dans l'axe	$f_{b,0^\circ}$	240 MPa
Résistance en tension dans l'axe	$f_{t,0^\circ}$	240 MPa
Résistance en tension à 90°	$f_{t,90^\circ}$	50 MPa
Résistance en compression dans l'axe	$f_{c,0^\circ}$	240 MPa
Résistance en compression à 90°	$f_{c,90^\circ}$	70 MPa
Résistance au cisaillement	f_τ	25 MPa
Module de Young dans l'axe	E_{0°	23 à 28 GPa ¹
Module de Young à 90°	E_{90°	8.5 GPa
Module de cisaillement	G	3 GPa

TABLE 3.1 – Caractéristiques des Profilés Fiberline

3.3 Facteurs partiels et coefficients

CUR96

La méthode de calcul des structures composites est une méthode par facteurs partiels. Ces facteurs de sécurité sont multiples et réfèrent aux différentes altérations imaginables pour le FRP. Ainsi 6 coefficients interviennent avec des valeurs variant selon les conditions et les matériaux. La formule est du type :

$$X_d = \frac{X_k * \eta_c}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

où :

- X_d la valeur de design
- X_k la valeur nominale caractéristique

1. La valeur du module dépend des profilés et se situe entre ces 2 valeurs, se référer aux tables pour obtenir la bonne valeur pour chaque élément.

- γ_M le coefficient sur le matériau, il est le produit de $\gamma_{M,1}$ et $\gamma_{M,2}$
- η_c le coefficient sur les conditions de vie du matériau, il est le produit de η_{ct} , η_{cm} , η_{cv} et η_{cf}
- Facteur partiel sur le modèle structurel et les déviations géométriques : $\gamma_{M,1} = [1.15; 1.35]$

Cette valeur vaut 1.15 ou 1.35 en fonction de l'origine des données utilisées (tests, données du fabricant, ...). Dans le cas où la valeur caractéristique provient de tests ou de données du fabricant, la valeur de 1.15 sera prise pour $\gamma_{M,1}$. Dans le cas de valeurs théoriques tirées du document CUR96 ou de toute autre littérature, la valeur de 1.35 prévaudra.

- Facteur sur l'incertitude sur les propriétés de résistance du matériau : $\gamma_{M,2} = [1.0; 2.0]$

Le Tableau 3.2 est valable pour les FRP dont le durcissement a été complété avant la mise en oeuvre sur site. Il est dit que le critère $\sigma_R \leq 0,10$ peut être supposé comme atteint avec les procédés de pultrusion, de pré-imprégnation, d'injection sous vide et d'enroulement. Pour le laminage à la main par contre, σ_R sera considéré dans les bornes suivantes : $0,10 \leq \sigma_R \leq 0,17$.

Propriétés du FRP	ELU	Stabilité locale	Stabilité globale
$\sigma_R < 0.10$	1.2	1.4	1.35
$0.10 < \sigma_R < 0.17$	1.5	2.0	1.5

TABLE 3.2 – CUR96 : Valeurs de $\gamma_{M,2}$

Il est à noter que pour les vérifications ELS, les facteurs $\gamma_{M,1}$ et $\gamma_{M,2}$ sont pris égaux à 1.0.

η_c est le produit de 4 facteurs provenant de la température, l'humidité, le fluage et la fatigue. Ces quatre facteurs entrent ou n'entrent pas en compte en fonction de l'aspect vérifié comme explicité dans le Tableau 3.5.

- Effets de la température : $\eta_{ct} = [0.9; 1.0]$

Dans les calculs ELU, η_{ct} vaut 0.9 tandis qu'en calcul ELS il vaut 1.0 si la température maximale de service est inférieure de plus de 40 degrés à la température de transition visco-élastique de la résine. η_{ct} vaudra 0.9 si la température maximale de service est inférieure de moins de 40 degrés à cette température de transition. Une température maximale de service supérieure à $T_g - 20^\circ$ n'est pas admissible.

Vérification Facteur	Résistance ELU	Stabilité ELU	Fatigue ELU	Fluage ELS	Flèche ELS	Vibrations ELS	Dommages ELS
η_{ct}	x	x	x	x	x	x	x
η_{cm}	x	x	x	x	x	x	x
η_{cv}	x	x		x			x
η_{cf}		x		x	x	x	x

TABLE 3.3 – CUR96 : Application des facteur η_c dus à l’environnement

De plus, si la température de service du FRP est supérieure à 40°C, ses propriétés à long terme doivent être déterminées sur base de tests ou de littérature adéquate.

— Effets de l’humidité : $\eta_{cm} = [0.7; 1.0]$

η_{cm} vaudra 1.0 pour une structure qui se trouve presque continuellement dans des conditions sèches, 0.9 pour des conditions d’humidité variables et 0.7 pour des structures presque continuellement exposées à des conditions humides dont des contacts directs avec de l’eau.

— Effets du fluage : $\eta_{cv} = \frac{1}{r_v * t^n}$

Ce coefficient doit être obtenu grâce à la formule ci-dessus ou r_v est l’augmentation théorique de la déformation dans le pli de FRP, t est la durée d’application de la charge en heures et n est un coefficient valant 0.01 pour un pli unidirectionnel, 0.04 pour un pli tissé et 0.10 pour un pli de type matelas. r_v se calcule comme le quotient de la déformation à long terme par la déformation instantanée de la charge appliquée, ce qui peut être exprimé comme suit : $r_v = \frac{E_i * t_{lam}}{\sum (E_{v,i} * t_{v,i})}$ où E_i est la rigidité initiale du laminé, t_{lam} est l’épaisseur du laminé et $\sum (E_{v,i} * t_{v,i})$ est la rigidité axiale du laminé dans la direction considérée en annulant les effets des fibres qui ne sont pas dans cette direction.

Deux valeurs repères sont données pour une durée de 100 ans et un FRP constitué de plis de fibres de verre E unidirectionnels : 0.44 pour un FRP quasi-isotrope (25% de fibres dans chaque direction principale) et 0.70 pour un FRP avec 55% de fibres dans la direction axiale du fluage calculé (et 15% de fibres dans chacune des autres directions principales).

— Effets de la fatigue : $\eta_{cf} = 0.9$

Comme indiqué dans le tableau d’application des coefficients celui-ci ne s’applique pas sur la résistance mais sur la rigidité. Il ne s’applique pas dans tous les cas mais seulement si le nombre de cycles de chargements est supérieur à 5000 ou si la charge de fatigue est supérieure à 40% de la charge de rupture. Dans le cas de passerelles,

la première condition sera tout le temps vérifiée, il faut donc tenir compte de ce coefficient.

Plus de détails sur la théorie de la fatigue appliquée au FRP sont abordés au point 3.4.

JRC Prospect

De même que dans le CUR96, la formule est la suivante :

$$X_d = \eta_c \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (3.2)$$

où :

- X_d la valeur de design
- X_k la valeur nominale caractéristique
- γ_M le coefficient sur le matériau, il est le produit de
 - $\gamma_{M,1}$ et $\gamma_{M,2}$
- η_c le coefficient sur les conditions de vie du matériau, il est le produit de η_{ct} , η_{cv} , η_{ck} et η_{cf}
- Facteur partiel sur les propriétés du matériau : $\gamma_{M,1} = [1.0; 1.35]$
 Ce facteur vaut 1.0 quand le procédé de production est certifié par un membre de l'Organisation Européenne pour l'Evaluation Technique (EOTA). Il vaut 1.15 si les valeurs proviennent de tests et 1.35 si les valeurs viennent de modèles théoriques disponibles dans la littérature.
- Incertitudes dues à la nature des constituants et au mode de production : $\gamma_{M,2} = [1.35; 2.0]$

Dans le cas de structures mise en place après la cure de la résine, les facteurs de sécurité sont ceux du Tableau 3.4. Pour des structures dont la cure n'a pas été faite avant la mise en place, ces facteurs sont à multiplier par 1.2. Notons que la valeur de σ_R doit être déterminée à l'aide de tests.

Propriétés du FRP	ELU	Stabilité locale	Stabilité globale
$\sigma_R < 0.10$	1.35	1.5	1.35
$0.10 < \sigma_R < 0.17$	1.6	2.0	1.5

TABLE 3.4 – JRC Prospect : Valeurs de $\gamma_{M,2}$

Il est noté que pour les vérifications ELS, les facteurs $\gamma_{M,1}$ et $\gamma_{M,2}$ sont pris égaux à 1.0.

η_c est le produit de 4 facteurs issus de la température, des UV et de l'humidité, du fluage et de la fatigue. Ce sont des facteur multiplicateurs et donc inférieurs à 1. Leur application diffère du CUR96 selon le tableau 3.5.

Vérification Facteur	Résistance ELU	Stabilité ELU	Fatigue ELU	Fluage ELS	Flèche ELS	Vibrations ELS	Dommages ELS
η_{ct}	x	x	x	x	x	x	x
η_{cm}	x	x	x	x	x	x	x
η_{cv}	x	x		x			x
η_{cf}		x		x	x	x	x

TABLE 3.5 – JRC Prospect : Application des facteur η_c dus à l'environnement

— Effets de la température : $\eta_{ct} = [0.9;1.0]$

Pour les vérifications à l'ELU η_{ct} sera égal à 0.9. A l'ELS, si la température de service est inférieure d'au moins 40 degrés à la température de transition visco-élastique de la résine η_{ct} sera égal à 1.0. Comme pour le CUR96, il vaudra 0.9 si la température maximale de service est inférieure de 20 degrés ou plus à cette température de transition.

Dans le cas d'utilisation de FRP à des températures élevées, le facteur de sécurité devra être déterminé par tests.

— Effets de l'environnement, de l'humidité et des UV : $\eta_{cm} = [0.8;1.0]$

Les FRP sont classés selon 3 catégories. La catégorie I vaut pour des FRP ne subissant pas d'influence de l'humidité (éléments toujours secs, à l'intérieur). La catégorie II vaut pour les FRP subissant une petite influence, à l'extérieur à des températures inférieures à 30°C. Enfin la catégorie III vaut pour les FRP continuellement exposés à de l'eau, avec des expositions fortes aux UV et/ou des températures de 30-40°C. Les conditions de cure de la résine influencent aussi ce facteur.

— Effets du fluage : $\eta_{cv} : [0.23;1.0]$

Le facteur dû au fluage dépend de la durée d'application des charges (courte à permanente) et du type de FRP (pultrudé, laminé, enroulement,...).

Deux valeurs principales ressortent pour les applications en construction pour une durée d'application des charges de 20 ans. Pour les composites de type laminés comportant 50% de fibres, la valeur standard vaut 0.67. Pour les composites pul-

classe	curé	non-curé
I	1.0	1.0
II	0.9	0.8
III	0.8	non-autorisé

TABLE 3.6 – Valeurs de η_{cm}

trudés avec 50% de fibres, cette valeur vaut 0.75. Pour toutes les nuances de ce facteur, il faut se référer aux explications détaillées du document JRC Prospect (page 60 du document original).

— Effets de la fatigue : $\eta_{cf} = 0.9$

Les conditions d'application de ce coefficient sont les mêmes que pour le CUR96, à savoir un nombre de cycle supérieur à 5000 ou une charge supérieure à 40% de la charge de rupture. Cette réduction n'est valable que pour la perte de rigidité du FRP. Plus de détails sur la théorie de la fatigue appliquée au FRP seront abordés au point 3.4.

US guideline

Le facteur de sécurité sur la résistance limite des FRP est donné par défaut : en tension, compression, cisaillement et flexion, il est de 2.5. Au niveau des connexions, ce facteur est relevé à 3.0. Ces valeurs sont basées sur un programme test de 5 ans par E.T. Techtonics Inc, un programme fondée par la Fondation Nationale des Sciences.

Fiberline guideline

Un coefficient γ_m est appliqué sur la résistance nominale caractéristique R_k . Celui-ci est le produit de plusieurs coefficients provenant de la méthode de production, le degré de cure de la résine, les incertitudes dimensionnelles et la température d'utilisation.

Les trois premiers de ces coefficients sont déterminés et ne varient pas :

- méthode de production : $\gamma_{m,1} = 1.15$ (uniquement profilés pultrudés Fiberline)
- degré de cure : $\gamma_{m,2} = 1.1$ (la cure est supposée complète)
- incertitudes dimensionnelles : $\gamma_{m,3} = 1.0$ (profilés Fiberline)
- influence de la température : $\gamma_{m,4} = [1.0; 3.13]$ voir Tableau 3.7.

Il est à noter que pour les valeurs entre 60 et 80°C, la valeur peut être obtenue par interpolation.

T° d'utilisation, conditions sèches [°C]	$\gamma_{m,4}$ charge à court terme	$\gamma_{m,4}$ charge à long terme (>1 an)
-20<T°<60	1.0	2.5
80	1.25	3.13

TABLE 3.7 – Fiberline guideline : Valeurs de $\gamma_{m,4}$

3.4 Fatigue

CUR96

Le point 6.6 du CUR96 décrit le comportement en fatigue des FRP sous les conditions d'application du guide et pour certains matériaux précisés. La théorie classique de la fatigue s'applique, en l'occurrence :

$$\sum_i^M \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (3.3)$$

où

n_i est le nombre de sollicitations à une certaine intensité de contrainte

N_i est le nombre limite de sollicitations que le matériau peut endurer

Les courbes $\sigma - N$ sont quant à elles données par la formule 3.4. Celle-ci est adaptable à différentes compositions de FRP et à différents types de sollicitations (traction, traction-compression, compression). Ces données sont exprimées pour des FRP à fibres avec $35\% \leq V_f \leq 65\%$ dont au moins 12.5% de fibres vont dans chaque direction principale.

$$\log(N) = k \cdot \log\left(\frac{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_M \cdot \sigma_{Max}}{\eta_c \cdot B}\right) \quad (3.4)$$

Les variables de cette formule sont données dans le Tableau 3.1. Celles-ci découlent d'essais. [18]

JRC Prospect

La section 6.5 de ce document traite des effets de la fatigue à l'ELU. La théorie, les formules et les valeurs des coefficients sont strictement identiques au CUR96. Cependant, le CUR96 n'est pas cité directement comme source dans ce chapitre.

UD legsel	Glas/epoxy UD legsel		Glas/polyester UD legsel		Carbon/epoxy UD legsel	
	k	B	k	B	k	B
$R = -1$ (trek-druk)	-10	$600 \cdot (V_f/0,55)$	-9	$700 \cdot (V_f/0,55)$	-15	$900 \cdot (V_f/0,55)$
$R = 0,1$ (trek)	-10	$1100 \cdot (V_f/0,55)$	-7	$1300 \cdot (V_f/0,55)$	-30	$1200 \cdot (V_f/0,55)$
$R = 10$ (druk)	-18	$750 \cdot (V_f/0,55)$	-	-	-	-

FIGURE 3.1 – CUR96 : Variables pour la formule des courbes de fatigue

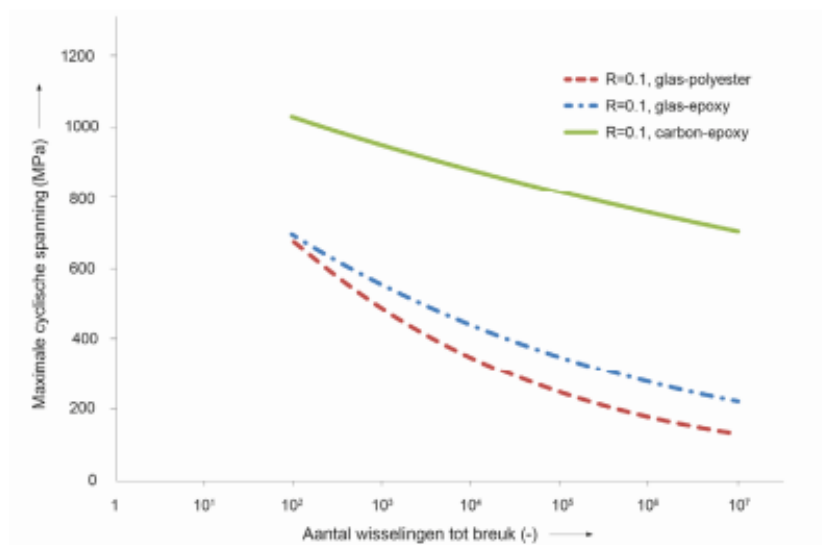


FIGURE 3.2 – CUR96 : Courbes σ - N pour différentes compositions de FRP avec $V_f = 55\%$ [18]

US guideline

Au sein de ce guide, la fatigue n'est pas considérée comme importante pour les passerelles en FRP. Il est indiqué la phrase suivante comme justification : "Les problèmes de fatigue, qui sont critiques dans la conception de l'acier, ne s'appliquent pas aux ponts composites en FRP. Cela est dû au faible module d'élasticité, qui fait que les structures de pont sont conçues pour répondre aux exigences d'aptitude au service tout en présentant de faibles niveaux de contrainte".

Fiberline guideline

Le sujet de la fatigue n'est pas abordé dans ce document.

3.5 Critères ELU

CUR96

Ce document reprend de manière exhaustive les critères qui pourraient mener à la ruine de la structure en FRP tant pour les stratifiés, que pour les éléments longitudinaux (barres, profilés), les panneaux sandwich et les éléments plaques et coques. Les vérifications à effectuer pour les stratifiés sont divisées en trois niveaux : les plis, les laminés et les sections entières.

Au niveau des plis c'est le critère dit de "Tsai-Hill" qui est à respecter. Ce critère correspond à la vérification de la résistance de la lamelle extrême d'un laminé, il est sécuritaire en ce sens que l'endommagement de ce pli ne mène pas forcément à la ruine de tout le laminé. Il s'exprime mathématiquement comme suit :

$$\left(\frac{\sigma_{1,Sd}}{\sigma_{1,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{2,Sd}}{\sigma_{2,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12,Sd}}{\tau_{12,Rd}}\right)^2 - \frac{\sigma_{1,Sd} \cdot \sigma_{2,Sd}}{\sigma_{i,Rd}^2} \leq 1 \quad (3.5)$$

A l'échelle du laminé ce sont les critères de non déformabilité excessive qui s'appliquent comme suit :

$$\epsilon_{x,Ed} \leq \frac{\eta_c \cdot 1.2}{\gamma_M} \quad (3.6)$$

$$\epsilon_{y,Ed} \leq \frac{\eta_c \cdot 1.2}{\gamma_M} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_{xy,Ed} \leq \frac{\eta_c \cdot 1.6}{\gamma_M} \quad (3.8)$$

Et enfin au niveau de la section complète ce sont les critères combinés d'effort normal, de moment, de cisaillement et de torsion qui s'appliquent comme suit :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \frac{V_{y,Ed}}{V_{y,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} + \frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} \leq 1,0 \quad (3.9)$$

Les vérifications des profilés sont des vérifications plus classiques, similaires aux vérifications à effectuer sur des profilés métalliques par exemple. La résistance axiale, le moment résistant, le cisaillement, la torsion et la combinaison de ces effets sont à vérifier pour les sections des éléments profilés.

Les panneaux sandwichs possèdent eux quelques modes de ruine particuliers qui doivent être vérifiés si le noyau de ces panneaux est pris en compte dans la résistance. Cela sera souvent le cas si celui-ci est une structure de type nid d'abeilles, à l'inverse des noyaux constitués de mousse (PU, PVC, etc.) servant souvent de coffrages perdus pour le FRP.

JRC Prospect

Bien qu'allant moins dans les détails que le CUR96, dans ce document sont exprimés de manière claire et bien structurée les critères à respecter pour différents types d'éléments composites, à savoir les profilés, les stratifiés et les panneaux sandwich.

Pour les profilés, ces critères sont assez classiques : traction, compression, flexion simple, cisaillement, torsion ainsi que flexion composée.

Pour les éléments stratifiés composés de multiples plis, il est indiqué qu'il faut vérifier les éléments à deux échelles différentes : le pli et le laminé complet. Le critère à respecter pour les plis est le critère de Tsai-Hill. A l'échelle du laminé, pour un design préliminaire, les mêmes critères d'élongation que précisés ci-dessus dans le CUR96 s'appliquent. La stabilité des laminés face à un éventuel flambement ou déversement doit aussi être vérifiée.

Concernant les panneaux sandwich, une série de modes de ruines sont évoqués avec les critères à respecter. Ceux-ci sont bien illustrés à l'aide de schémas.

US guideline

Dans ce guide, aucun critère de résistance n'est défini clairement et caractérisé avec une formule.

Seule l'annexe H cite des critères utilisés pour le dimensionnement à l'ELU. Cette annexe décrit point par point tout le processus de construction d'une passerelle depuis la conception jusqu'à la mise en place effective du pont, en passant par des essais pré-installation en laboratoire. Les critères vérifiés sont les résistances classiques d'éléments longitudinaux, à savoir la traction, la compression, la flexion et les combinaisons de ces efforts.

Fiberline guideline

Les théories classiques de résistance des matériaux sont décrites dans ce document ainsi que leurs applications aux éléments pultrudés de FRP. Ces théories expliquent la résistance des sections en tension, l'application de la théorie d'Euler pour tenir compte du flambement en compression, les effets combinés de la flexion et d'autres efforts éventuels, la résistance en cisaillement, etc. Chaque critère est accompagné d'un exemple concret de son application et d'une illustration de la situation prise en exemple.

3.6 Critères ELS

CUR96

Les vérifications s'effectuent principalement sur la flèche et l'aspect dynamique de la structure. Il est également précisé que les dommages que pourraient subir l'ouvrage durant son utilisation doivent être acceptables.

Les formules classiques de la flèche de poutre sur deux appuis, poutre encastrée, etc sont rappelées. Cependant, aucune norme sur la flèche maximale acceptable n'est mentionnée, cette limite devra provenir du cahier des charges propre à chaque ouvrage.

Les formules pour la fréquence propre d'éléments longitudinaux et d'éléments rectangulaires de type plaques sont données. Dans les calculs de la réponse dynamique, un effet d'amortissement minimum (0.5%) ou moyen (1%) peut être appliqué.

Outre les formules données, l'utilisation de logiciels effectuant des calculs aux éléments finis est considérée comme acceptable.

Les règles à respecter en termes de confort sont les normes des Pays-Bas (NEN-EN 1990 et 1991).

JRC Prospect

Comme pour le CUR96, les vérifications portent sur la flèche, l'aspect vibratoire et les dommages potentiellement subis. Ces critères à respecter ne sont pas quantifiés explicitement, il faudra se référer au cahier des charges ainsi qu'aux normes en vigueur en fonction des ouvrages à concevoir.

Les calculs des déformations et des vibrations doivent tenir compte du vieillissement futur de la structure.

Pour le calcul de la réponse fréquentielle des ouvrages, un coefficient d'amortissement de 1 à 1.5% peut être considéré comme réaliste.

US guideline

La flèche maximale admissible recommandée par ce guide est de $L/240$. Tandis que la fréquence fondamentale du premier mode propre dans la direction verticale doit être supérieure à 5 Hz, et supérieure à 3 Hz dans la direction horizontale.

Aucune formule n'est donnée pour effectuer les calculs qui permettraient de vérifier ces valeurs limites.

Fiberline guideline

Le dimensionnement des poutres fait que leur flèche maximale causée par le cas de charge le plus défavorable sera généralement entre $L/400$ et $L/200$.

Il n'est nulle part fait mention de critère vibratoire.

3.7 Conclusion

CUR96

Le CUR96 est certainement le guide le plus complet à ce jour. Les valeurs caractéristiques, les coefficients et les méthodes à appliquer sont clairs et expliqués dans le détail. Cependant la théorie reste incomplète, en témoignent les nombreux paragraphes de ce guide où, dès que les matériaux où l'application sort un petit peu des lignes *classiques*, il est nécessaire d'effectuer des tests pour déterminer les valeurs à utiliser.

JRC Prospect

Ce guide s'inspire grandement du CUR96 avec quelques différences dans les coefficients et dans la méthode de calcul, les résultats en suivant ce guide devraient être très proches du CUR96. Comme attendu au vu de l'introduction de ce guide, il se rapproche d'un guide et de normes de type Eurocode sans encore en avoir l'exhaustivité.

US guideline

Ce guide est peu complet et très exclusif sur son utilisation. Les calculs sont peu détaillés, les coefficients sont peu détaillés et ne s'adaptent pas selon les situations possibles. Le matériau auquel s'applique ce document est unique. La variété de systèmes structuraux est quasi inexistante.

Fiberline guideline

Ce guide est spécifique aux profilés produits par Fiberline. Il est suffisamment précis et utile dans cette utilisation spécifique.

Chapitre 4

Application des Méthodes de Dimensionnement

Afin d'observer pratiquement les différences entre les normes comparées au chapitre précédent, nous allons les appliquer à un cas de référence d'une passerelle. Cela permettra d'interpréter ces dernières et les coefficients utilisés ainsi que d'identifier les forces et lacunes de chacune d'entre elles.

Afin de couvrir le spectre le plus large possible, 3 designs seront calculés pour la passerelle. Un premier design en matériaux "traditionnels", c'est-à-dire en acier et en béton. Cela permettra d'avoir une référence accessible avant de couvrir les solutions en FRP. Pour appliquer les documents de références analysés au chapitre 3, deux solutions en FRP sont calculées : une mettant en place un système de treilli en éléments pultrudés et l'autre utilisant un système de tablier porteur. Au sein de ces solutions, les coefficients des différents guides applicables sont comparés.

Bien évidemment, nous nous baserons sur un cahier des charges identique pour chaque dimensionnement.

4.1 Cahier des charges

4.1.1 Structure

Le cas d'application est une passerelle piétonne de 4m de large, possédant une portée de 15m de long avec un système statique tel que schématisé sur la Figure 4.1. Celle-ci permet de franchir bon nombre d'obstacles types tels que les rivières ou les routes non cyclables. Cette étude ayant pour objet les matériaux composites, nous calculerons la structure principale de la passerelle mais nous n'effectuerons pas le dimensionnement pour les deux appuis.

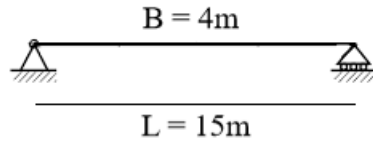


FIGURE 4.1 – Schéma statique de la passerelle

4.1.2 Charges

Les charges appliquées à cette passerelle sont prises conformément à la norme Européenne EN1991-2. En plus des charges permanentes (le poids propre de la structure portante, du tablier, du garde-corps et du revêtement), les charges variables appliquées sont les suivantes :

- Une charge surfacique verticale uniforme représentant le poids d'une foule de piétons : $5kN/m^2$
- 4 charges ponctuelles verticales modélisant le poids d'un véhicule de service telles que schématisées à la Figure 4.2 (cas de charge accidentel)

Le cas d'application le plus sévère aura lieu lors d'une combinaison des charges du véhicule et des piétons avec les roues les plus chargées du véhicule (Q_{SV1} sur la Figure 4.2) se trouvant à $7m$ d'un des appuis de la passerelle.

Des composantes horizontales viennent s'ajouter à ces charges verticales. Elles modélisent les accélérations dues au caractère dynamique de ces dernières. Elles suivent la direction de la passerelle et sont caractérisées par des valeurs de respectivement 10% de la charge uniforme et 60% des charges ponctuelles.

4.1.3 Critères dimensionnant

La passerelle sera conçue pour résister aux différentes charges sous combinaisons à l'ELU. Néanmoins, et comme très souvent, ce sont les critères d'ELS qui risquent d'être déterminants. Il convient donc de fixer ceux-ci en suivant certaines normes.

Afin de garantir le confort d'utilisation et le confort visuel de la passerelle nous limiterons les flèches à $l/350$ sous charges variables et $l/250$ pour la déformation totale. Cela correspond à des déformations de respectivement $43mm$ et $60mm$.

Concernant l'aspect dynamique de la structure, nous limiterons également les fréquences propres de vibration de la passerelle. Le trafic piétonnier est une action dynamique et les pas des piétons peuvent agir à des fréquences entre $1Hz$ et $3Hz$ de manière verticale et entre $0.5Hz$ et $1.5Hz$ horizontalement.

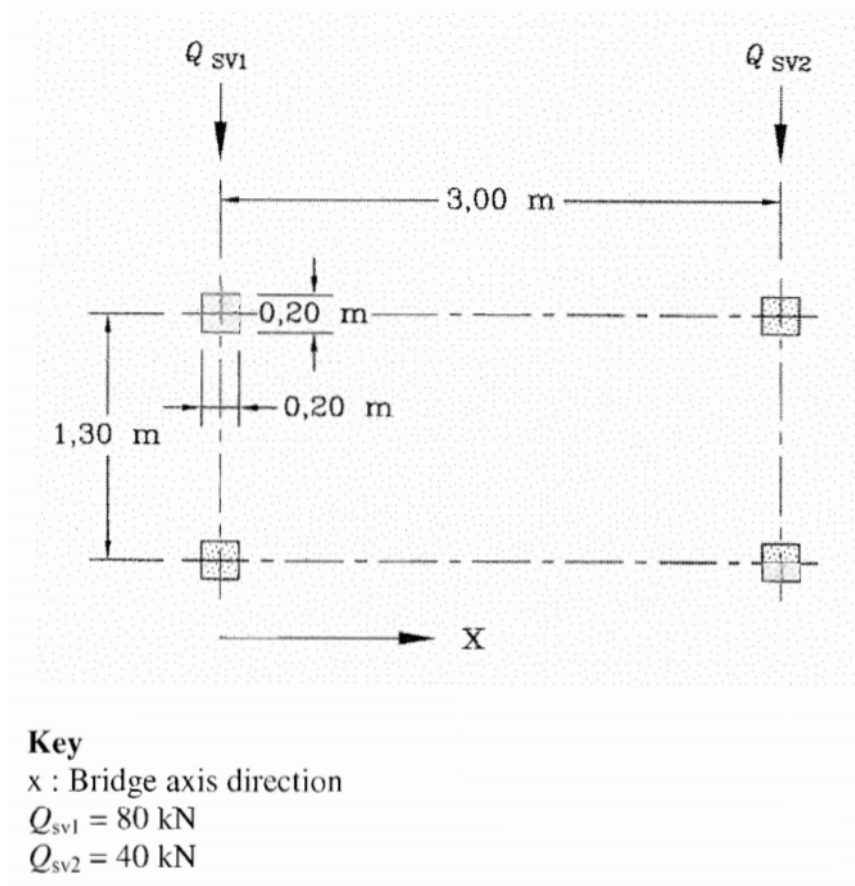


FIGURE 4.2 – Schéma des charges occasionnées par un véhicule de service [33]

Il faut donc que les fréquences propres de la structure ne se trouvent pas dans ces intervalles afin d'éviter un phénomène de résonance. Cela pourrait accroître l'inconfort voire causer la ruine de notre ouvrage.

4.2 Méthodologie Appliquée

Pour nos calculs de dimensionnement, nous avons principalement utilisé deux logiciels de structure : SCIA Engineer et Robot Structural Analysis.

Nous avons utilisé SCIA lors du dimensionnement de la première solution : une passerelle en matériaux classiques acier et béton. Nous avons opté pour ce logiciel dans ce premier cas car il présente une grande facilité d'utilisation pour les structures acier et un traitement post-calcul intuitif et efficace. Il nous a donc servi pour les différents états limites, tant pour la structure porteuse que pour les



FIGURE 4.3 – Logos des logiciels SCIA et RSA

garde-corps. La dalle en béton servant de tablier a quant à elle été dimensionnée à l'aide d'un tableau Excel.

Pour les solutions en FRP, nous avons préféré utiliser Robot Structural Analysis car il nous permettait de gérer plus facilement les différentes propriétés des matériaux FRP.

4.3 Solution Acier

Avant de comparer les différentes normes concernant les FRP. Nous allons effectuer une première approche de dimensionnement de cette passerelle en structure acier. Cela nous permettra d'identifier les points sensibles du dimensionnement ainsi que d'avoir une référence à laquelle nous pourrions comparer nos résultats et leur cohérence.

4.3.1 Choix Structurels

Pour ce cas-ci, nous opterons pour une passerelle composée de deux poutres porteuses auxquelles viennent se fixer un tablier en béton et le garde-corps. Ce système statique est inspiré de la passerelle située sur le chemin des lorrains à Louvain-la-Neuve (Figure 4.4) dont les dimensions sont similaires à notre cahier des charges.

Les profilés utilisés pour franchir cette portée seront des IPE pour leur inertie importante selon l'axe fort. L'utilisation de profilés HE sera envisagée si les IPE ne suffisent pas mais leurs largeurs et épaisseurs ne nous semblent pas nécessaires.

Pour le tablier, nous avons opté pour des pré-dalles de béton comme c'est le cas sur la passerelle de laquelle nous nous sommes inspirés. Elles permettent une mise

en oeuvre plus facile et moins coûteuse qu'un coffrage.

Les appuis de cette structure devront être pensés pour assurer la continuité de la passerelle par rapport au reste de la chaussée. Une rigidification des âmes des profilés IPE sera nécessaire afin de pouvoir les poser sur les appuis.

Concernant les garde-corps, nous avons suivi la norme nationale belge en respectant une hauteur de 1,2m.



FIGURE 4.4 – Passerelle reliant la gare des bus de Louvain-la-Neuve au quartier du Biéreau

4.3.2 Système Porteur

Pour dimensionner cette passerelle en acier, nous avons commencé par les poutres porteuses. En plus des charges variables décrites auparavant, nous avons considéré une charge permanente supplémentaire de $5kN/m^2$ représentant le poids d'une dalle de béton d'une épaisseur de 20cm.

$$25kN/m^3(\text{poids vol. du béton}) \cdot 0.2m(\text{ép. de la dalle}) = 5kN/m^2$$

ELU

Le premier critère étudié est la résistance à la rupture. D'après nos estimations et en comparant avec la passerelle de référence à Louvain-la-Neuve, les poutres

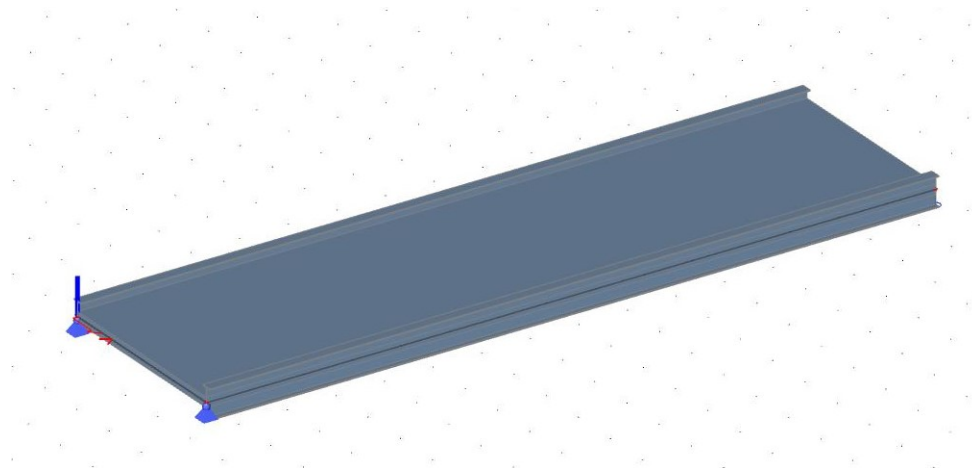


FIGURE 4.5 – Modèle SCIA de la solution par poutres porteuses en acier

devraient avoir une hauteur d'environ 50cm. Nous avons donc choisi des IPE500 en première hypothèse. Le moment sollicitant de $952.91kNm$ étant 1.22 fois plus important que le moment résistant, nous avons augmenté la hauteur de la poutre en choisissant un IPE550 possédant un moment résistant de $989.38kNm$.

Mais ce changement de profilé augmente également la masse de la structure, augmentant ainsi le moment sollicitant au dessus de la résistance du profilé. Notre choix s'arrêtera donc sur un IPE600 offrant un moment résistant de $1246.76kNm$ pour une sollicitation de $1120.54kNm$. La vérification en stabilité nous confirme que le profilé choisi ne rompra pas, nous pouvons donc vérifier les critères de service (détail en Annexe B.1.1).

ELS

La flèche la plus importante dans la structure est observée lors du critère d'ELS caractéristique avec 58.2mm soit $l/258$, le critère de $l/250$ est donc respecté. La flèche sous charges variables est quant à elle limitée à $l/542$, respectant donc le critère de $l/350$.

Concernant l'analyse dynamique de la structure (Annexe B.1.2), la première fréquence de la passerelle est de $3.2Hz$ et correspond au mode fondamental faisant entrer toute la structure en résonance. Etant donné que cette fréquence est supérieure au seuil critique de $3Hz$ verticalement et $1.5Hz$ horizontalement, nous pouvons affirmer que la structure respecte tous les critères d'états limites requis avec deux profilés IPE600 portant sur les 15m de long.

Contrôle en section	
Classification de section	1
Contrôle traction	0,00 -
Contrôle du moment de flexion pour M_y	0,90 -
Contrôle du moment de flexion pour M_z	0,00 -
Contrôle à l'effort tranchant pour V_y	0,00 -
Contrôle à l'effort tranchant pour V_z	0,00 -
Contrôle torsion	0,00 -
Contrôle combiné flexion, effort normal et effort tranchant	0,81 -
Conclusion - contrôle en section	0,90 -

Contrôle stabilité	
Classification de stabilité	1
Contrôle de déversement	0,92 -
Contrôle en flexion composée avec traction	0,92 -
Conclusion - contrôle de stabilité	0,92 -

FIGURE 4.6 – Sortie du logiciel SCIA concernant l'ELU des poutres porteuses

Critère	Résultat	Limite
Flèche ELS	$l/258$	$< l/250$
Flèche charges variables	$l/542$	$< l/350$
Fréquence propre	$3.2Hz$	$> 3Hz$

TABLE 4.1 – Résumé des critères d'ELS

4.3.3 Tablier

Le tablier n'est pas prévu pour reprendre des efforts sur la longueur de la passerelle, ses dimensions doivent simplement permettre de relier les 2 poutres. Nous allons donc vérifier qu'une dalle de béton armé de 20cm d'épaisseur suffit à relier les deux poutres.

Nous avons considéré une pré-dalle d'1.2m de large et portant sur les 4m de la largeur de la passerelle. En considérant les charges mentionnées plus haut, nous optons pour un quadrillage d'armatures composé de $\phi 10$ tous les 15cm.

Cette donnée n'influencera que très peu le poids propre de la dalle et nous n'itérerons donc pas le calcul des poutres porteuses effectué auparavant.

4.3.4 Garde-Corps

Nous avons opté pour un garde corps basique en acier composé de montants verticaux espacés d'1m et d'une main courante tubulaire. Selon la norme belge, cette dernière doit se trouver à 1,2m au-dessus du tablier (NBN B 03-103). Puisque

le dimensionnement de la rambarde n'est pas l'objet principal de ce travail, nous avons choisi un modèle basique comme représenté à la Figure 4.7. Dans un cas réel il faudrait évidemment combler les espaces entre les montants pour répondre à d'autres normes de sécurité. Le dimensionnement que nous proposons ici n'entend pas répondre à ces questions là.

Les montants verticaux viendront s'ancrer au niveau des semelles inférieures et supérieures des poutres IPE. Afin de permettre un assemblage et une conception aisée, nous optons ici pour un profilé un "T".

Toujours selon la même norme, les gardes corps doivent pouvoir reprendre une

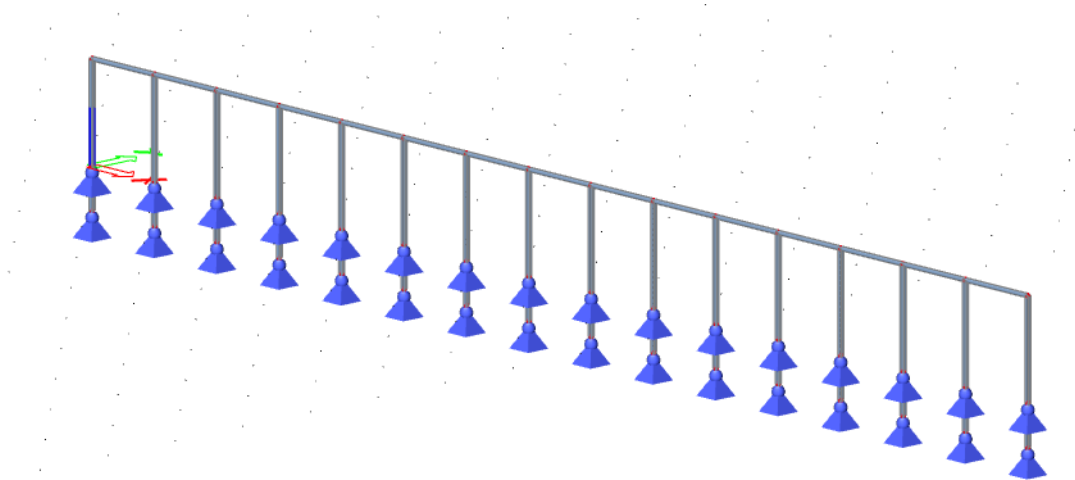


FIGURE 4.7 – Modèle SCIA du garde-corps conçu

charge verticale de $1kN/m$ à la main courante et $1kN$ de manière ponctuelle. A cela viennent s'ajouter leurs homologues horizontales qui sont deux fois plus faibles. Ces différentes données nous permettent de modéliser et dimensionner les profilés nécessaires tel qu'illustré dans la Figure 4.7.

Pour une question de confort de préhension, nous avons opté pour une main courante d'environ $5cm$ de diamètre. La section la plus fine que nous trouvons est un tube creux de $48.3mm$ de diamètre et $2.0mm$ d'épaisseur.

Le cas le plus dimensionnant est ici la combinaison des efforts normaux et de flexion composée. L'addition des $0.2kN$ en compression et des moments de $0.29kNm$ et $0.26kNm$ donne une sollicitation de 80% de la capacité de la section.

Concernant les montants verticaux, nous avons d'abord choisi des profilés en "T" de $50X50X6mm$ par souci de cohérence avec la main courante. Ceux-ci ne sont malheureusement pas suffisamment résistants en termes de flexion (moment sollicitant de $1.82kNm$ pour un moment résistant de $1.57kNm$)

Nous passons donc sur un profilé en "T" plus large de $60X60X7mm$ possédant lui un

moment résistant de $2.65kNm$. Par souci d'homogénéité avec la main courante, nous choisissons pour cette dernière un tube de $60.3mm$ de diamètre et $2mm$ d'épaisseur.

4.3.5 Assemblages

L'assemblage entre le montant vertical du garde-corps et le profilé IPE se fera au moyen de deux équerres qui seront soudées à l'IPE et boulonnées au montant du garde-corps. Cet assemblage sera situé aux deux semelles de l'IPE orienté vers l'âme de la poutre tel qu'illustré à la Figure 4.8 (l'équerre est en bleu et les boulons en vert).

Des équerres constituées de 2 carrés de $60 \times 60mm$ conviennent parfaitement à cette application. Il reste à déterminer l'épaisseur de cette dernière, la longueur et l'épaisseur du cordon de soudure ainsi que la taille et le nombre de boulons.

Ces dimensions vont dépendre des efforts à transmettre qui sont de $3.45kN$ verticalement et $5.18kN$ horizontalement (données du modèle SCIA).

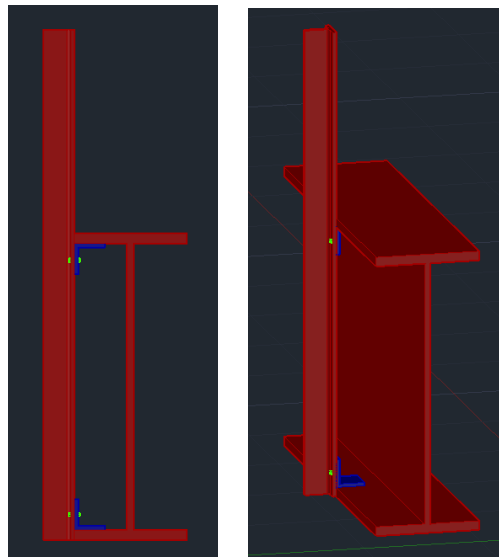


FIGURE 4.8 – Modélisation de l'assemblage garde-corps/poutre porteuse

Etant donné l'épaisseur de la semelle des IPE, le cordon doit avoir une épaisseur d'au moins $5mm$ selon les règles constructives sur l'épaisseur de la gorge (voir Figure 4.8).

En prenant cette valeur comme maximum, nous obtenons toujours via ces règles que l'épaisseur de la plaque doit être de minimum $7mm$ ($6.88mm$ arrondis).

En termes de résistance de l'assemblage soudé, la longueur du cordon doit être

d'au moins 5mm (4.98mm arrondis) afin de résister aux 5.18kN . En soudant les trois cotés des équerres aux semelles des poutres on se trouve du côté de la sécurité et le design est durable en terme d'infiltration de l'humidité entre les équerres et les semelles.

Concernant les boulons, les limitations s'appliqueront au niveau de l'espace dispo-

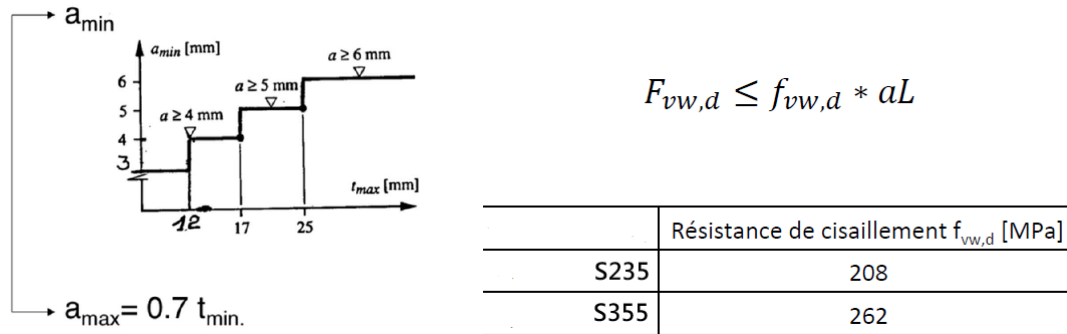


FIGURE 4.9 – Règles constructives sur les dimensions du cordon de soudure

nible ainsi que de l'effort à transmettre. Nous optons pour 2 boulons, un de chaque côté de l'âme du "T" sur les 19.5mm disponibles.

Afin de résister aux 3.45kN cisailant les boulons, nous choisissons des boulons $M6$ de classe 4.8.

De par son importante épaisseur, la plaque de l'équerre du côté boulonné n'aura aucun mal à résister aux efforts, que ce soit en pression diamétrale, en section nette ou en section brute.

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M_2}} \quad F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M_2}} \quad N_{Pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{m0}} \quad N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{m2}}$$

(a) Cisaillement du bou- (b) Pression diamétrale (c) Résistance du (d) Résistance du plat en
lon sur le plat plat en section brute section nette

FIGURE 4.10 – Formules de calcul de résistance d'un assemblage boulonné

4.3.6 Résumé

Avec un design simple et efficace, cette solution de passerelle remplit parfaitement le cahier des charges. Ses deux IPE600 et son tablier en béton armé de 20cm d'épaisseur lui confèrent une masse d'environ 38 tonnes.

4.4 Première Solution Composite

Pour cette première approche de dimensionnement en FRP, nous utiliserons des profilés pultrudés. Nous nous baserons sur les catalogues de 2 entreprises leader du marché ainsi que les recommandations techniques qui les accompagnent. La première référence sera Fiberline, son guide et son catalogue sont regroupés en un seul document : le Fiberline Design Manual qui a été analysé au chapitre précédent. L'autre catalogue envisagé pour cette première solution provient de l'entreprise Strongwell. Pour l'application et les règles à respecter nous nous baserons sur le document du département des transports des USA "A Guide to Fiber-Reinforced Polymer Trail Bridges", lui aussi analysé au chapitre 3.

Ces différents documents ont pu être trouvés en ligne et certains extraits que nous avons utilisés se trouvent dans l'Annexe B.2.1.

Le design utilisé est très proche de la solution en matériaux traditionnels de la section 4.3. En effet, l'idée est d'utiliser des profilés pultrudés comme poutres porteuses de la passerelle afin de franchir les 15m. Si une telle solution n'est pas envisageable, nous miserons alors sur un design en treillis. Les garde-corps en treillis contribueront alors à la résistance et la rigidité de la structure.

4.4.1 Choix Structurels

Les deux entreprises (Fiberline et Strongwell) gardent secrètes les proportions de fibres ainsi que la composition exacte de leur résine, nous nous fierons donc aux valeurs caractéristiques fournies par ces fabricants dans leurs documents respectifs. Les seules certitudes que nous pouvons avoir sont que les profilés pultrudés sont fabriqués à base de fibre de verre et d'une matrice de polyester. Aucune information n'est donnée quant au pourcentage de fibres ni à leurs agencements et directions. Les coefficients varient fort entre ceux préconisés par Fiberline et ceux venant du US guideline. Tandis que le guide américain fournit un coefficient unique de 2.5, Fiberline fournit plus de détails, ceux-ci sont explicités dans le tableau 4.2.

Méthode de production	$\gamma_{m,1} = 1.15$
Degré de cure	$\gamma_{m,2} = 1.10$
Incertitudes dimensionnelles	$\gamma_{m,3} = 1.0$
Influence de la température	$\gamma_{m,4} = 1.0$
Total	$\gamma_m = 1.265$

TABLE 4.2 – Fiberline : Coefficients de sécurité

En appliquant ce coefficient de sécurité de 2.5 sur les caractéristiques des profilés Strongwell et de 1.265 sur les profilés Fiberline, nous obtenons les valeurs caractéristiques du Tableau 4.3.

Propriété	Fiberline	US Guideline
E (GPa)	22.13	6.88
G (GPa)	2.37	1.17
$f_{x,Rd}$ (MPa)	189.72	82.8
τ_{Rd} (MPa)	19.76	12.4

TABLE 4.3 – Valeurs caractéristiques des profilés FRP selon les recommandations

Au niveau des profilés utilisés, nous retiendrons les sections les plus hautes offrant un maximum d’inertie correspondant chez Fiberline à des IPE360 et chez Strongwell à des HE304 ou des IPE609.

La prise d’appuis de cette passerelle se fera aux extrémités des profilés principaux constituant le tablier. Afin de transmettre les efforts verticalement, un renforcement des profilés pourra se faire par collage d’éléments rigidificateurs. Les appuis rotulés pourront être constitués de blocs de néoprène sur lesquels seraient simplement posée la structure.

4.4.2 Système Porteur

Afin de juger de la faisabilité d’une solution en poutres porteuses, nous avons modélisé une simple poutre sur 2 appuis à laquelle nous appliquons $1kN/m$ de charge linéaire. Cette charge correspondrait aux $5kN/m^2$ de charges variables appliquée sur la largeur de la semelle du profilé (environ $20cm$).

Comme illustré à la Figure 4.11, la flèche de la poutre est trop importante et ne respecte pas les critères fixés en début de chapitre. L’IPE Strongwell se déforme de $108mm$ tandis que l’IPE de chez Fiberline atteint une déformation de $121.6mm$. C’est pourquoi l’idée d’une structure similaire à la solution en acier et béton n’est pas envisageable. Le design qui s’en approcherait le plus, tout en étant assez rigide et résistant, est un tablier qui serait entièrement structurel. Cette approche sera développée dans la deuxième solution de design en FRP. Dans ce premier dimensionnement en profilés, pour ajouter la rigidité nécessaire, nous passerons par la mise en place d’une structure en treillis.

La Figure 4.12 fournit un aperçu de l’agencement des profilés de cette passerelle. Afin de fournir les appuis nécessaires aux plaques de FRP utilisées pour le tablier

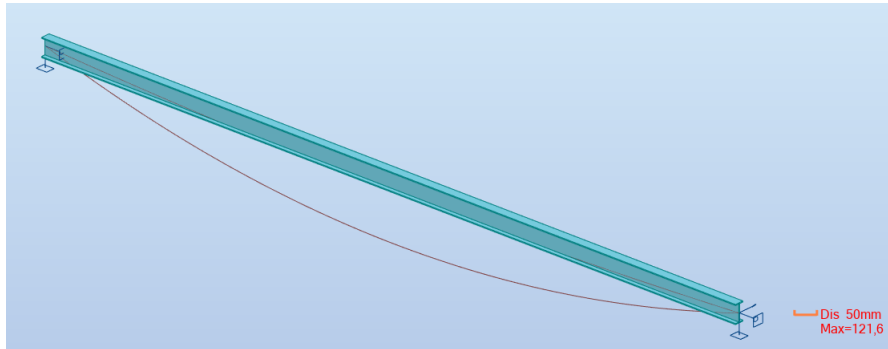


FIGURE 4.11 – Déformation à l'ELS d'un profilé Fiberline sous $1kN/m$

(cfr. point suivant), 5 poutres longitudinales (profilés en I) formeront la base. Ces poutres seront reliées entre elles par d'autres profilés de section carrée. Sur les cotés de la passerelle, deux treillis faits de sections carrées font office de garde-corps tout en amenant la rigidité nécessaire. Le treillis présentera des mailles de $1.2m$ sur $0.75m$ en largeur et répondra aux mêmes normes que celui dimensionné en acier au point 4.3.4.

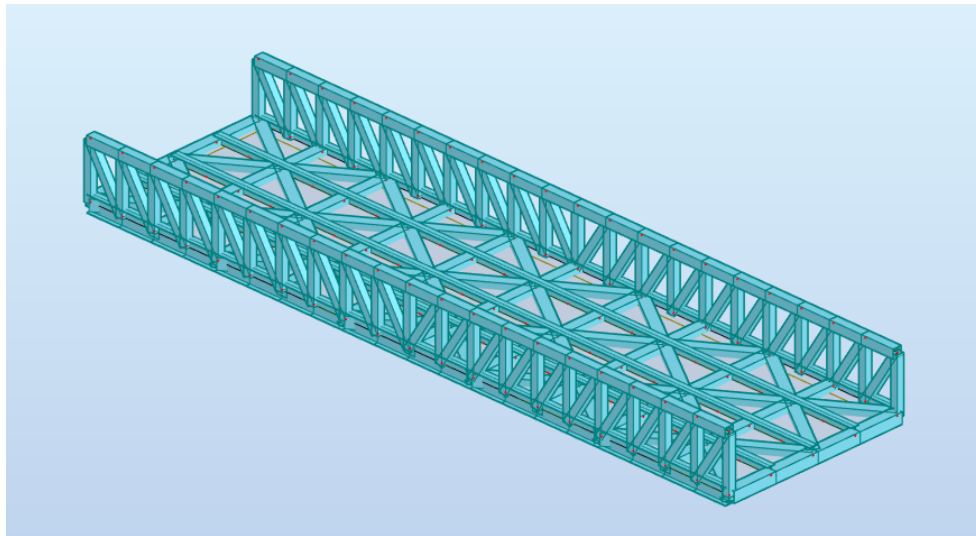


FIGURE 4.12 – Solution en treillis avec des profilés Fiberline

Les flèches finales de la passerelle ont été obtenues suite à une itération manuelle des profilés utilisés sur le logiciel Robot Structural Analysis (RSA pour la suite) afin de respecter les critères ELS décrits plus hauts. Les sections sont toutes tirées des différents profilés carrés disponibles chez les fabricants.

Après plusieurs itérations, nous avons obtenu une structure telle qu'illustrée sur notre modèle RSA à la Figure 4.12. Celle-ci nous permet de limiter la flèche à l'ELS à $58.9mm$ (limite à $60mm$) et celle sous charges variables à $42.8mm$ (limite à $43mm$). Le tableau reprenant toutes les flèches est disponible dans l'annexe B.2.2.

Concernant l'aspect dynamique, les critères (min $3Hz$) sont également respectés étant donné que la fréquence fondamentale de la passerelle est de $6.5Hz$ verticalement (voir Annexe B.2.2).

A l'ELU, nous sommes bien en dessous des valeurs de résistance limite du FRP ($190MPa$) avec des contraintes maximales de $60.21MPa$ en compression, $38.6MPa$ en traction et un cisaillement maximal de $5.66MPa$ (voir Annexe B.2.3) ces contraintes se développent dans les diagonales et les éléments supérieurs des treillis.

Voici les profilés Fiberline utilisés pour la solution de passerelle en treillis :

- Main courante : $200X200X10mm$
- Garde-corps (montants et diagonales) : $160X160X8mm$
- Treillis Plancher : $240X240X12mm$
- Poutres Plancher : IPE $609.6X9.53 // 190.5X19.05mm$

En appliquant la même méthodologie à une passerelle qui serait construite à base de profilés de chez Strongwell et en utilisant les valeurs des coefficients de sécurité recommandées par la US Guideline, nous ne sommes pas arrivés à concevoir une passerelle assez rigide. Comme le montre la Figure 4.13, qui illustre un design similaire mais en augmentant encore la dimension des profilés du tablier, la passerelle se déforme de manière excessive : jusqu'à $125mm$.

Cela s'explique par le faible module d'élasticité que recommande la US Guideline. En effet, la valeur initiale proposée par Strongwell dans ses fiches techniques de $17.2GPa$ doit encore être divisée par un facteur de sécurité élevé, valant 2.5.

Après une analyse des principales valeurs caractéristiques utilisées ainsi qu'une revue des passerelles existantes utilisant un système structurel en treillis. Nous nous sommes rendus compte que le cahier des charges choisi limite sans doute les possibilités d'utilisation des profilés de FRP. La largeur utile du cahier des charges mène à un chargement important et donc à des profilés épais. Le transfert des efforts vers les treillis ainsi que la rigidification de ceux-ci pose problème. L'idée que les profilés FRP ne sont pas adaptés à une structure en treillis sera développée au point 4.4.7.

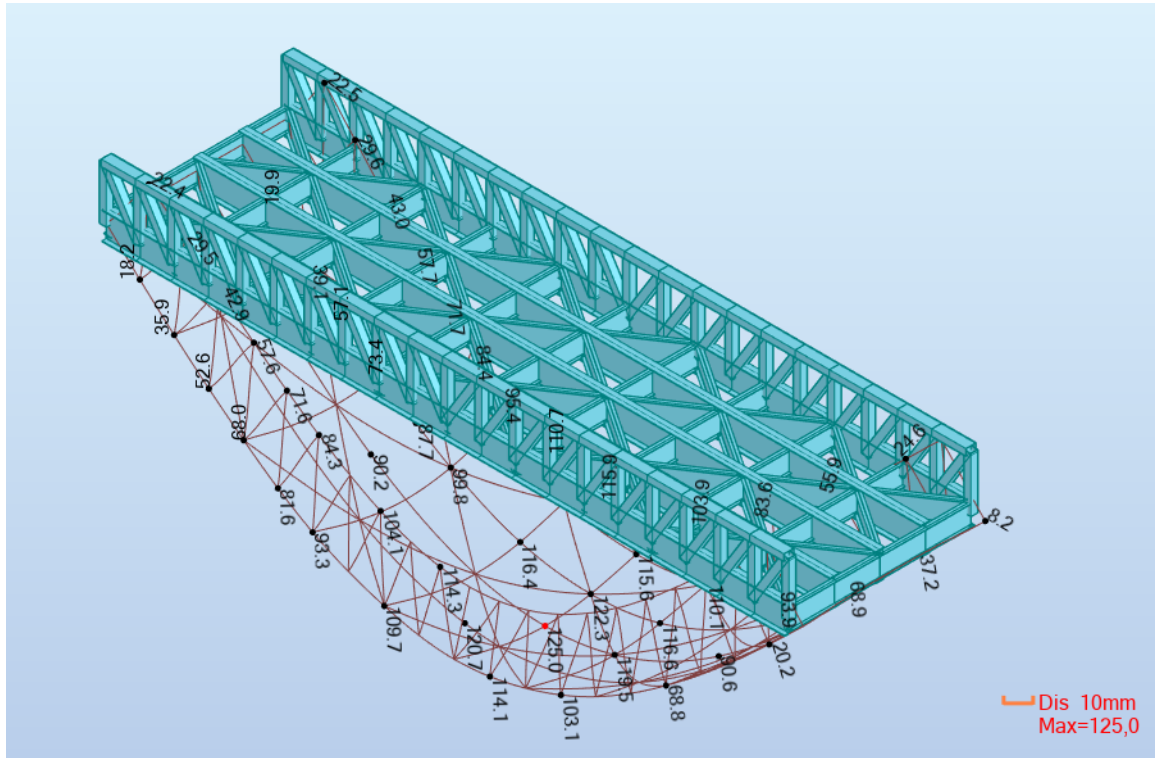


FIGURE 4.13 – Déformation de la passerelle avec des profilés Strongwell à l'ELS

Pour la suite nous continuerons seulement le dimensionnement de la passerelle avec les profilés et les valeurs de Fiberline.

4.4.3 Tablier

Fiberline propose des plaques en FRP pultrudées pouvant faire office de tablier. La série "MD plank" s'adresse aux charges faibles telles que celles d'une passerelle piétonne. Le fabricant propose également une table des capacité de chargement en fonction de la portée ainsi que du critère à respecter (Figure 4.14).

Sachant que notre tablier doit être capable de reprendre une charge de $5kN/m^2$ en respectant la condition de flèche de $l/250$, l'espacement des poutres porteuses ne peut pas dépasser $1m$ afin de garantir le confort des utilisateurs. Cette portée correspond à l'espacement des poutres principales de notre structure.

Au niveau de la résistance, nous pouvons observer dans ce même tableau qu'elle est largement supérieure au chargement que nous appliquons.

Span L [m]	Load capacity per meter width		
	Deflection L/200 [kN/m ²] around z-axis	Deflection L/300 [kN/m ²] around z-axis	Failure [kN/m ²] around z-axis
0.25	325.63*	276.03	325.63
0.50	75.79	50.53	162.81
0.75	24.57	16.38	83.43
1.00	10.72	7.15	46.93
1.25	5.58	3.72	30.03
1.50	3.25	2.17	20.86
1.75	2.06	1.37	15.32
2.00	1.39	0.92	11.73
2.25	0.98	0.65	9.27
2.50	0.71	0.47	7.51

FIGURE 4.14 – Tableau de charges pour une plaque "Fiberline MD plank"

4.4.4 Vérification à la fatigue

A l'aide des courbes de fatigues fournies dans les documents CUR96 et JRC Prospect, il est possible de tracer les courbes $\sigma - N$ correspondant au cas de notre matériau ($V_f = 50\%$, matrice de polyester et fibre de verre). Les profilés de notre structure les plus sollicités à la traction sont les diagonales extrêmes du treillis où :

$$\sigma_t = 38.6 MPa \quad (4.1)$$

En rapportant cette valeur de sollicitation sur les courbes de fatigue (formule du point 3.4, nous pouvons voir avec la Figure 4.15 que le nombre de cycles possible est de l'ordre de 10^8 . Dans la réalité cette valeur de contrainte maximale n'arrivera que très rarement (sollicitations ELU), il n'y a donc aucun problème possible en fatigue pour les profilés de cette passerelle.

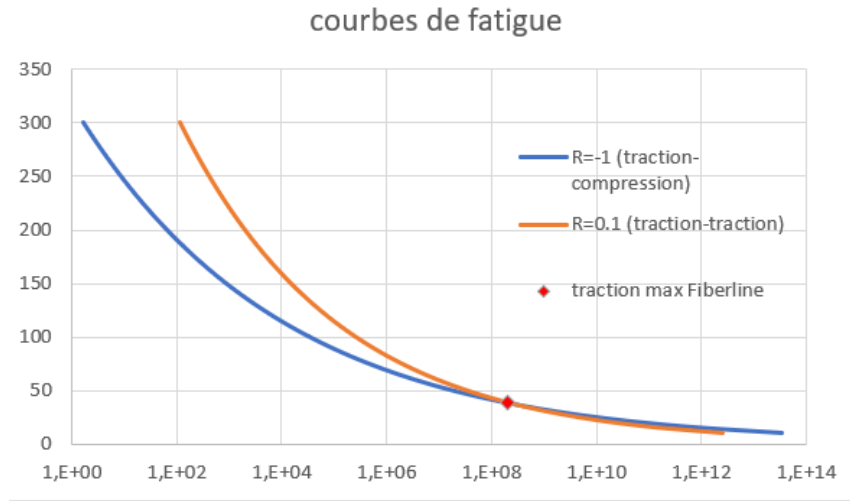


FIGURE 4.15 – Résistance à la fatigue de l'élément le plus sollicité en traction

4.4.5 Garde-Corps

Les 2 treillis se situant de part et d'autre du tablier font office de garde-corps. Leur hauteur est de 1.2m, ce qui respecte la norme Belge (NBN B 03-103). En termes de résistance, les sections utilisées doivent pouvoir reprendre les charges de la passerelle. Elles sont donc largement suffisantes pour assumer les charges de dimensionnement d'un garde-corps : $1kN/m$ et $1kN$ ponctuel verticalement sur la main courante, la moitié horizontalement.

4.4.6 Assemblages

Trois solutions existent pour assembler les profilés composites : le collage, le boulonnage ou une combinaison des deux. Chacune de ces solutions a ses avantages et ses inconvénients. Le collage n'affecte pas l'intégrité des profilés et ne comporte pas de risque de serrage excessif. De son côté le boulonnage possède comme avantage d'être plus facilement contrôlable, d'avoir la plupart du temps un comportement plus ductile et d'être démontable.

Etant donné la largeur des sections qui composent notre structure et leur agencement complexe, nous nous rendons compte de la difficulté de concevoir les assemblages de manière précise et sûre. C'est un désavantage majeur pour cette solution et pour cette raison nous n'irons pas plus loin dans la conception des assemblages de cette structure.

4.4.7 Résumé

Cette solution de passerelle en profilés FRP est complexe mais possède un avantage considérable, son poids. En effet la masse de cette passerelle serait de l'ordre de 8 tonnes.

Cependant utiliser une solution composée de profilés pultrudés et un système de deux treillis n'est pas optimal dans le cas de notre cahier des charges. Le US Guideline ne permet pas de créer une passerelle répondant à nos spécifications tandis que l'application de celui fourni par Fiberline nous en fait percevoir les limites. Des assemblages complexes et un design peu élégant mettant en oeuvre des profilés de plus de 20cm de coté dans les treillis sont des désavantages certains de cette passerelle. Une solution qui pourrait être appliquée est d'augmenter la hauteur des treillis à 2.5-3m. Cependant cela rendrait le design de la passerelle beaucoup plus imposant.

Une revue des passerelles utilisant ce système structurel montre que dans l'immense majorité des cas, elles sont beaucoup plus étroites que notre cas. La passerelle de Pontresina, les illustrations du US Guideline, la Passerelle d'Audubon Canyon Ranch et celle de Kuskovo (pour ne reprendre que des exemples présent dans ce mémoire) ont toutes une largeur d'environ autour d'1m80. Ces exemples réels nous laissent penser qu'une structure en treillis conviendrait pour une passerelle plus étroite mais est difficilement applicable dans ce cas ci.

4.5 Deuxième Solution Composite

Cette deuxième solution de passerelle en FRP met en place un design où le tablier reprend l'ensemble des charges appliquées. Cette solution est inspirée des ouvrages réalisés par FiberCore Europe.

Nous suivrons ici les recommandations permettant de dimensionner d'autres éléments que des profilés pultrudés : le CUR96 d'une part et le JRC Prospect de l'autre. Nous tenterons de mettre en évidence les quelques différences entre les deux afin de voir si elles sont déterminantes lors du dimensionnement.

4.5.1 Choix Structurels

Comme souvent, nous utiliserons une combinaison de fibre de verre de type E ainsi qu'une matrice à base de polyester, chaque composant représentant la moitié du volume total du FRP.

Étant donné le caractère longitudinal de notre structure, nous optons pour un arrangement de fibres principalement dans le sens de la portée avec 55% des fibres dans l'axe (0°) et à chaque fois 15% orientés à +45°, -45° et 90°.

La résine sera injectée sous vide une fois l'agencement des fibres réalisé, cela permettra une bonne répartition dans toute la structure. Les blocs de mousse de polyuréthane qui servent de moule perdu au FRP ne seront pas pris en compte lors des calculs de résistance. Le bénéfice structurel de ces blocs est par contre réel puisqu'il empêche le flambement des fines âmes qui font la liaison entre les deux semelles.

Au niveau des coefficients de sécurité et facteurs d'environnement appliqués nous avons considéré une température maximale de service de 60°C et une température de transition visco-élastique de la résine de 80°C ainsi que des conditions d'humidité variables. Un résumé des coefficients appliqués est visible dans le Tableau 4.4.

Facteur	CUR96 ELU	JRC ELU	CUR96 ELS	JRC ELS
$\gamma_{M,1}$	1.35	1.35	1	1
$\gamma_{M,2}$	1.2	1.35	1	1
η_{ct}	0.9	0.9	0.9	0.9
η_{cm}	0.9	0.9	0.9	0.9
η_{cv}	0.7	0.65	1	1
η_{cf}	1	1	0.9	0.9
Total	2.86	3.46	1.37	1.37

TABLE 4.4 – Coefficients appliqués selon la norme et l'état limite

La passerelle sera appuyée à ses deux extrémités, et ce sur toute sa largeur. Un appui sera rotulé et pourrait par exemple se traduire physiquement par une couche de 3cm de néoprène afin d'assurer une transmission uniforme des efforts.

4.5.2 Système Porteur

Pour dimensionner ce tablier porteur, nous avons modélisé plusieurs sections rectangulaires côte à côte comme illustré à la Figure 4.16. Cette modélisation est simplifiée par rapport à la solution réelle envisagée mais correspond d'un point de vue structurel. La première simplification est la non représentation des différents plis de composites. En effet, ces plis ont été résumés à la caractéristique globale du FRP avec les compositions citées au point 4.5.1.

La deuxième simplification réside dans le fait que les âmes transversales à la portée ne sont pas représentées. Lors de la mise en place des blocs de mousse et des tissus de fibres, des fibres sont également placées à la jointure entre les blocs de mousse, faisant apparaître après moulage sous vide des âmes qui participeront à la rigidification horizontale du tablier.

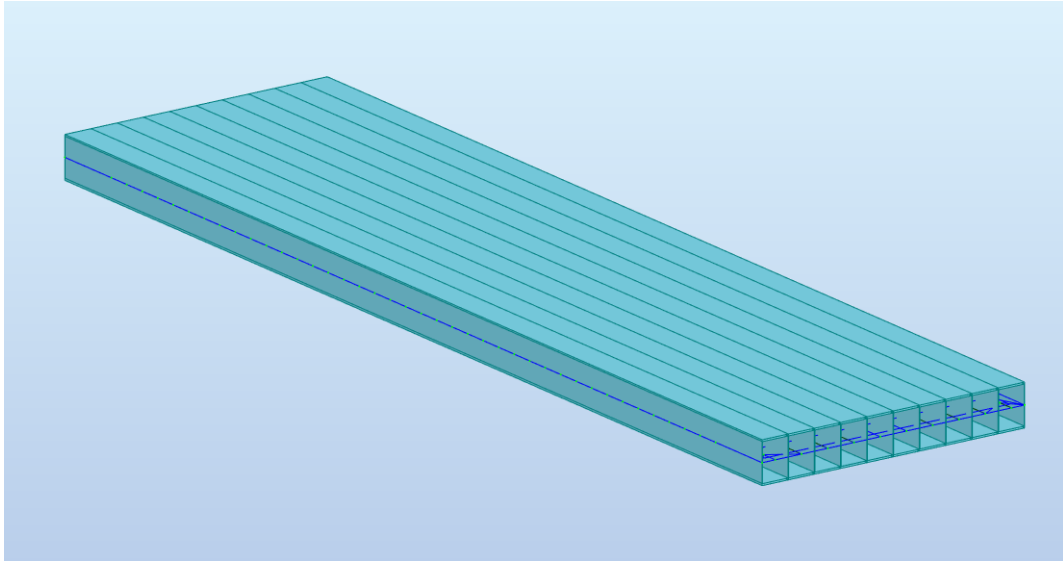


FIGURE 4.16 – Modèle RSA de la passerelle en tablier porteur

La modélisation sur RSA nous a mené à opter pour des caissons de 40cm de large, ayant une âme de 5mm d'épaisseur et des semelles de 25mm d'épaisseur. Cette différence entre âme et semelles vient de la construction en "Z" de la technologie InfraCore Inside que nous avons voulu modéliser. En effet, les semelles des "Z" se prolongent par dessus plusieurs caissons afin d'assurer une semelle continue sur toute la largeur de la passerelle (voir Figure 2.12). Cela permet d'éviter l'apparition de lignes de faiblesses dans le tablier.

Afin d'avoir une finition uniforme avant la mise en place de la couche de roulement, un dernier pli d' 1mm d'épaisseur vient recouvrir tout le tablier. L'avantage de cette couche est double car elle nous permet de modéliser les charges surfaciques sur l'ensemble de la structure dans le modèle RSA.

Propriété	Caractéristique	CUR96 ELU	JRC ELU	CUR96 ELS	JRC ELS
$E \text{ (GPa)}$	25.8	9.03	7.45	18.81	18.81
$G \text{ (GPa)}$	5.6	1.96	1.62	4.08	4.08
$f_{x,Rd} \text{ (MPa)}$	310	108.49	89.55	225.99	225.99
$f_{y,Rd} \text{ (MPa)}$	191	66.85	55.18	139.24	139.24
$\tau_{Rd} \text{ (MPa)}$	90	31.5	20	65.61	65.61

TABLE 4.5 – Propriétés du FRP selon la norme et l'état limite

Avec ces paramètres fixés, il reste à déterminer la hauteur des caissons nécessaire afin de rencontrer les critères de résistance et de flèche. Dans un premier temps, nous baserons le dimensionnement sur le critère de flèche en utilisant les recommandations du CUR96 et du JRC Prospect, ces critères étant les mêmes. Une fois la structure validée d'après ces norme, nous vérifierons que les critères ELU selon le CUR96 et le JRC Prospect sont également remplis.

ELS

Nous commençons notre démarche avec une hauteur de tablier de 50cm , dans la même logique que pour la solution de passerelle en acier évoquée précédemment. Grâce au modèle RSA, nous trouvons facilement la flèche à l'ELS de la passerelle qui est de 80.8mm .

Un tablier de 55cm de haut permet de diminuer la flèche mais pas de manière suffisante. Celle-ci est de 65.9mm alors que la limite est toujours fixée à 60mm . Avec 60cm d'épaisseur de tablier, le critère de flèche est largement respecté : 54.7mm .

Étant donné le processus de fabrication sur mesure de ce genre de tablier, une

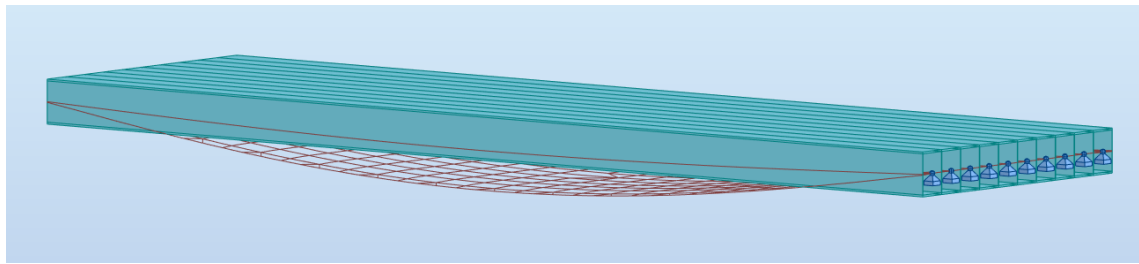


FIGURE 4.17 – Modèle RSA de la déformée à l'ELS de la passerelle

optimisation au cm près nous permet de déterminer qu'une hauteur de 58cm représente la section la moins épaisse tout en respectant le critère de flèche. En effet, le tablier se déformerait de 58.8mm à l'ELS et 42.6mm sous l'effet des charges variables (max 43mm).

D'un point de vue dynamique, la première fréquence propre de la passerelle est de 4.79Hz et est donc au dessus du seuil des 3Hz . La première fréquence horizontale est elle à 9.16Hz .

Les détails des différentes valeurs mentionnées ci-dessus se trouvent dans l'Annexe B.3.1.

ELU CUR96

Les contraintes maximales observées sont de $20.2MPa$ en traction et en compression. Elles se situent bien évidemment dans les semelles supérieures et inférieures du tablier. Les contraintes de cisaillement maximales se trouvent quant à elles au niveau des appuis dans les âmes et valent $6.27MPa$.

Ces valeurs se situent évidemment en dessous de valeurs de résistance du FRP qui sont respectivement de $108.49MPa$ en traction et compression et de $31.5MPa$ en cisaillement. Le détail de ces valeurs se trouve en Annexe B.3.2.

ELU JRC Prospect

Afin de déterminer si les différences entre les 2 normes sont notables, nous appliquons les coefficients du JRC Prospect au dimensionnement. Nous commençons par appliquer ces coefficients au FRP en gardant la section choisie précédemment via le CUR96.

Avec la hauteur de tablier de $58cm$, les critères ELU sont toujours respectés. Les contraintes maximales en traction et en compression sont les mêmes qu'en appliquant le CUR96, tout comme celles de cisaillement (respectivement $20.2MPa$ et $6.27MPa$). Les $89.55MPa$ de résistance en traction et compression, ainsi que les $20MPa$ de résistance au cisaillement ne sont donc pas atteints.

4.5.3 Vérifications ELU propres aux FRP

Le dimensionnement que nous avons effectué s'est basé dans un premier temps sur le critère de flèche, critère qui nous semblait déterminant en première approche. Cependant nous avons vu au point 3.5 que les guides recommandaient de vérifier des critères un peu plus complexes dans les cas de FRP stratifiés. Ces vérifications sont à effectuer sur plusieurs niveaux : les plis, les laminés et les sections entières. Les vérifications des sections ont déjà été effectuées au point précédent à l'aide du modèle RSA, il reste à vérifier le critère de Tsai-Hill et le critère de déformation maximale.

La formule du critère de Tsai-Hill est la suivante :

$$\left(\frac{\sigma_{1,Sd}}{\sigma_{1,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{2,Sd}}{\sigma_{2,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12,Sd}}{\tau_{12,Rd}}\right)^2 - \frac{\sigma_{1,Sd} \cdot \sigma_{2,Sd}}{\sigma_{i,Rd}^2} \leq 1 \quad (4.2)$$

En analysant cette formule on voit que les termes de contraintes dans le matériaux sont au nombre de trois : les deux contraintes axiales et la contrainte en cisaillement.

Lorsque la contrainte de cisaillement est maximale (dans les âmes), la contrainte axiale très faible et l'inverse en vrai aussi dans les plis des semelles. Ces efforts coexistent donc peu dans notre structure.

L'analyse des contraintes axiales perpendiculaires au sens de la portée de la passerelle sont pour leurs part négligeables. La passerelle portant sur toute sa largeur, les transferts d'efforts n'ont pas à s'effectuer transversalement dans le tablier.

Cette analyse corrélée par notre modèle RSA, ainsi que la marge de sécurité disponible à l'ELU calculée au point précédent nous permet de dire que ce critère de Tsai-Hill est respecté partout.

Le critère de non déformabilité excessive est lui aussi toujours respecté car le comportement linéaire des FRP fait que cette déformation de 1.2 ou 1.6% ne sera atteinte que lorsque la contrainte maximale admissible est atteinte.

4.5.4 Garde-Corps

Le système de garde corps peut être similaire à celui imaginé pour la passerelle en acier et béton. La liaison au tablier se fera sur les cotés latéraux de celui-ci au moyen d'écrous scellés dans le FRP. La hauteur du tablier permet d'écarter les ancrages afin d'assurer la stabilité de cette structure métallique qui sert de garde corps.

4.5.5 Assemblages

Aucune assemblage de FRP n'est nécessaire dans cette solution.

4.5.6 Résumé

Le système de tablier porteur est une solution efficace pour notre passerelle de 15m de long et 4m de large. Il permet, avec une hauteur de tablier suffisante, de franchir cette portée tout en respectant les critères d'ELS et d'ELU.

En comparaison, pour un design similaire, la solution acier sur 2 poutres porteuses requiert des profilés IPE600, en plus du tablier en béton de 20cm. La hauteur totale est donc environ 20cm moins importante avec du FRP en tablier porteur.

La masse de cette passerelle serait de 11 tonnes, à laquelle il faut ajouter le poids du garde corps pour obtenir une valeur finale.

4.6 Bilan

La passerelle en FRP conçue selon les normes limitées aux profilés pultrudés (Section 4.4) permet une structure extrêmement légère. Cependant, les sections utilisées ainsi que leur densité nécessitent des assemblages d'une grande complexité, ce qui représente un désavantage majeur de cette passerelle.

La passerelle FRP en système de tablier porteur (Section 4.5), bien qu'un peu plus lourde que son homologue en treillis pesant 8 tonnes, reste bien plus légère que la passerelle en acier et en béton d'environ 38 tonnes. L'absence d'assemblage permet à la passerelle d'être entièrement préfabriquée et d'être installée très rapidement. De plus, son aspect élancé grâce à son épaisseur moindre en fait une alternative de choix aux matériaux classiques.

Chapitre 5

Idées Reçues et Limitations Réelles des Composite dans les Passerelles

5.1 Coût des FRP

Le coût d'un ouvrage en FRP est plus élevé qu'en matériaux traditionnels.

5.1.1 Arguments pour

Les matériaux sont pour le moment plus chers que l'acier ou le béton et requièrent une main d'oeuvre spécifiquement formée. Les entreprises capables de livrer de tels ouvrages sont encore rares et les maîtres d'ouvrage sont donc limités dans leurs possibilités de faire jouer la concurrence. De plus, l'utilisation des FRP étant encore en phase de développement, les passerelles et autres constructions ne sont sans doute pas encore optimisées, le coût de production est donc relativement élevé. Dans un monde qui valorise de plus en plus le recyclage et la réutilisation des matériaux, les possibilités des FRP sont actuellement limitées.

5.1.2 Arguments contre

Les avantages économiques indirects d'une passerelle en FRP sont nombreux. En raison du poids propre très faible de la passerelle, les fondations pourront être réduites par rapport à la même structure construite en acier ou en béton. La préfabrication massive ainsi que la légèreté permettent un gain de temps non négligeable au niveau de l'installation, des perturbations de circulation mais aussi une économie au niveau du transport et de l'équipement à mobiliser.

La durée de vie théorique d'une passerelle en FRP est bien supérieure à celle d'une passerelle similaire constituée d'autres matériaux plus traditionnels. Cela permet d'amortir le coût initial et ainsi d'offrir une économie sur le long terme. L'entretien nécessaire devrait également être moins fréquent et coûteux¹.

5.1.3 Bilan

Le marché n'a pas encore un recul suffisant pour voir l'avantage économique qu'apporteront sans doute les FRP. Toutefois, dans les prochaines années ou décennies, le coût des ouvrages en FRP devrait devenir de plus en plus concurrentiel.

5.2 Durée de Vie

La durée de vie des ouvrages en FRP est bien meilleure que des ouvrages similaires en béton et/ou en acier.

5.2.1 Arguments pour

Les FRP présentent sur papier plusieurs atouts pour améliorer leur durabilité. Le fait qu'ils soient très peu altérés par l'humidité est un avantage majeur par rapport à l'acier et aux armatures du béton.

En nécessitant un entretien moins important et régulier, une structure en FRP aura tendance à mieux tolérer une certaine négligence en se dégradant moins qu'une structure en matériau classique qui demanderait plus d'attention.

5.2.2 Arguments contre

La durée de vie complète d'un ouvrage en FRP en conditions réelles n'a pas encore pu être complètement éprouvée. Des problèmes et des faiblesses inattendus pourraient apparaître et la manière de concevoir les ouvrages devrait alors évoluer. Cela est, par exemple, déjà le cas avec les techniques mises en oeuvre par Fibercore et leur technologie InfraCore Inside pour palier aux problèmes connus dans les panneaux sandwichs (résistance aux impacts, délamination, fatigue).

1. Ces informations sont corrélées par toute la littérature que nous avons consultée. Il faut cependant garder à l'esprit que le FRP est un matériau trop récent pour avoir des ouvrages ayant atteint leur durée de vie prévue.

5.2.3 Bilan

La durée de vie typique d'un pont en acier est de 50 à 75 ans et cette durée de vie est légèrement supérieure pour les ouvrages en béton armé.

Avec des durées de vie prévues de 100 ans, la durabilité des ouvrages en FRP est promise à un bel avenir à condition d'adapter les conceptions de passerelles et autres ouvrages à ce matériau hautement technologique et de ne pas simplement l'appliquer en gardant des design classiques des matériaux plus traditionnels.

5.3 Fatigue

Les problèmes de fatigue sont importants.

5.3.1 Arguments pour

Un des points faibles des FRP se situe indéniablement à l'interface entre les couches de fibres. Si une fissure doit se propager c'est dans cette zone que cela aura lieu. Dans le cas de dégâts préalables dans les FRP dus à un ou plusieurs impacts, les zones fragilisées seront plus sensibles à des problèmes de fatigue.

5.3.2 Arguments contre

Les ouvrages de type ponts et passerelles en FRP sont sur-dimensionnés du point de vue de la résistance pure. Cela vient du fait que ces structures ont un comportement à l'ELS qui n'est pas excellent et il faut donc leur donner une grande inertie pour palier à ces potentiels problèmes de résonance et de flèche dus aux charges variables. Ce sur-dimensionnement en résistance mène au fait que les variations de sollicitation à la base des problèmes de fatigues sont trop faibles que pour induire des dommages de fatigue dans les composites.

Avec un design adéquat dans les empilements de plis et une limitation des interfaces franches aux endroits où des sollicitation tridimensionnelles sont probables, il est possible de réduire les potentiels risques liés à la fatigue.

5.3.3 Bilan

Dans la majorité des cas rencontrés dans l'application spécifique "passerelles pour piétons et cyclistes", la fatigue ne jouera pas de rôle déterminant dans le dimensionnement. Les sollicitations cycliques sont très faibles par rapport à la résistance.

Il faudra néanmoins rester attentifs aux fragilités qui pourraient apparaître à la suite d'impacts.

5.4 Portée des Passerelles

Les portées sont limitées.

5.4.1 Arguments pour

L'excellente résistance du FRP permet de réaliser des passerelles élancées. Cela implique une faible inertie et donc un manque de rigidité par rapport aux sollicitations piétonnes. Les fréquences propres de ces passerelles sont trop basses et correspondent aux fréquences d'excitation provoquées par une foule piétonne. La légèreté du matériau joue également en sa défaveur. En effet, les charges variables représentent une proportion plus importante de la masse modale que sur une passerelle en matériaux classiques.

Ces effets couplés engendrent une amplitude et une accélération ressentie trop importante et ce comportement dynamique sera parfois un problème dimensionnant.

5.4.2 Arguments contre

Les FRP possèdent d'excellentes propriétés mécaniques qui leur permettraient de supporter leur poids propre sur des portées plus importantes que l'acier ou le béton. En les couplant à des systèmes statiques réfléchis comme c'est le cas avec les matériaux classiques (ponts suspendus, haubanés, bowstrings, ...) ou en augmentant l'épaisseur des tabliers, les problèmes dynamiques que ces passerelles rencontrent au dimensionnement pourraient être évités.

Une autre solution serait l'utilisation d'amortisseurs de masse contrôlés (Tuned Mass Dampers ou TMD en anglais). Ces équipements sont déjà utilisés dans des cas de passerelle piétonne en matériaux classiques comme ce fut notamment le cas avec le Millenium Bridge de Londres. Bien qu'encore relativement onéreux, ces TMD ont déjà fait leurs preuves et permettraient aux passerelles en FRP d'atteindre des portées à la hauteur de la résistance du matériau.

5.4.3 Bilan

Les portées des passerelles en FRP sont, comme pour tout matériau, limitées. Néanmoins, ce matériau permettrait d'atteindre des portées théoriquement plus importantes que tout autre matériau classique de par sa résistance spécifique élevée.

5.5 Impact Environnemental

Les FRP ont une lourde empreinte environnementale due à leur recyclage limité.

5.5.1 Arguments pour

Il existe quatre niveaux de recyclage, allant de la réutilisation complète du matériau sans dégradation des propriétés pour le niveau primaire jusqu'à la valorisation énergétique par incinération pour le niveau quaternaire.

Les résines thermodures ne peuvent, par définition, pas être remises en forme. Il est donc impossible d'avoir un recyclage primaire des éléments de structure en FRP. Les processus de recyclage qui permettraient un recyclage secondaire (réutilisation du matériau avec perte de certaines propriétés mécaniques) sont laborieux et coûteux dû au fait de devoir séparer les composants du FRP. L'incinération de ce matériau entraîne la perte des fibres tandis que la *digestion acide* utilise des produits nocifs et demande un traitement supplémentaire coûteux et polluant.

5.5.2 Arguments contre

Les FRP étant très durables dans le temps, le recyclage ne serait nécessaire que tous les 100 ans dans le cas des passerelles. Cela diminue donc l'impact environnemental rapporté à la durée de vie des ouvrages.

Par pyrolyse, les résines (thermodures comme thermoplastiques) peuvent être transformées en hydrocarbures tandis que les fibres, bien qu'abimées, peuvent être récupérées. Par broyage, le produit peut être utilisé comme remplisseur en tant que matière inerte, que ce soit dans des fondations ou dans certains produits en FRP. Les résines sont des produits issus d'hydrocarbures et un recyclage de type quaternaire est toujours possible. Celui-ci consiste à récupérer par incinération l'énergie contenue dans le matériau sous forme de chaleur dans des centrales thermiques.

Au delà de l'aspect recyclage, la faible masse des FRP permet une mise en place moins énergivore en limitant les impacts liés au transport des structures.

5.5.3 Bilan

Le recyclage complet est laborieux mais possible grâce notamment à la pyrolyse ou au broyage. Le traitement des déchets par pyrolyse permet de réutiliser le produit dans plus d'applications que le broyage. La durabilité des FRP pourrait mener à un meilleur impact environnemental que les matériaux traditionnels.

Afin de confirmer ou d'infirmer cette idée il serait intéressant d'effectuer une analyse

de cycle de vie complète comparant une solution composite ainsi qu'une solution en matériaux *traditionnels*.

Chapitre 6

Conclusion et Perspectives

Lors de cette étude, nous nous sommes rendus compte que les composites, bien que connus et largement utilisés dans d'autres domaines, sont encore en phase de développement dans le génie civil. La manière de dimensionner et les problèmes qui se poseraient en aéronautique et dans ses autres applications ne sont pas transposables directement à l'utilisation qui en serait faite dans une passerelle en raison de la différence dans les types de sollicitations.

Les quatre guides analysés pour la construction en FRP montrent des approches différentes et donnent des résultats qui varient. Une norme Européenne telle qu'un Eurocode permettrait d'ouvrir certaines possibilités tant pour les ingénieurs que pour les maîtres d'ouvrages.

Dans le cas de la passerelle que nous avons étudié, la flèche a systématiquement été l'élément dimensionnant. C'est dû à la largeur importante de l'ouvrage par rapport à sa longueur. Nous imaginons assez bien qu'une passerelle plus étroite ou de plus grande portée sera plus facilement influencée par les phénomènes vibratoires. Cet aspect pourrait même devenir le critère dimensionnant de la passerelle.

Les avantages massiques de l'utilisation d'un FRP composé de fibres de verre et d'une matrice polyester par rapport à la solution en matériaux traditionnels (acier et béton) est claire. 78% d'économie au niveau de la masse pour la solution en treillis et 71% pour la solution de tablier porteur.

L'aspect économique n'a pas été abordé au cours de ce travail mais cela pourrait être un développement intéressant. Comparer la différence de coût initial, les économies possibles sur les fondations dues à une plus faible masse ainsi que les coûts d'entretien des différentes possibilités serait intéressant afin d'avoir une idée des potentielles économies à réaliser sur l'ensemble de l'ouvrage.

Le point de vue architectural et esthétique des possibilités en FRP n'est pas du tout abordé dans cette étude. Il faut garder à l'esprit qu'un travail d'amélioration esthétique des deux solutions en matériaux composites du chapitre 4 est possible, voire indispensable. Dans de nombreux cas de passerelles existantes une contre-flèche importante est présente ainsi qu'un travail remarquable sur les gardes-corps. Les possibilités d'originalité architecturale sont au moins aussi étendues qu'en acier et en béton.

Durant la partie dimensionnement de cette étude nous avons uniquement considéré un FRP à base de fibres de verre et d'une résine de polyester. Les avantages architecturaux et massiques des FRP pourraient être encore améliorés suite à l'utilisation de fibres de carbone. Par contre, cela se ferait au détriment du coût de l'ouvrage. L'incorporation de tissus carbone à certains endroits stratégiques pour rigidifier la structure nous semble une piste intéressante à suivre dans le cadre de la recherche.

Table des figures

1.1	Agencements de fils [1]	3
1.2	Exemples d'assemblages de fils [1]	4
1.3	Schéma du procédé de pultrusion[3]	5
1.4	Equipements de la chaîne de pultrusion de Fiberline[3]	6
1.5	Schéma du procédé d'empilement [4]	7
1.6	Procédé de pulvérisation [5]	7
1.7	Schéma du procédé d'injection sous vide[6]	8
1.8	Schéma du procédé d'enroulage filamentaire [9]	9
2.1	Evolution du module longitudinal et transversal selon l'orientation des fibres pour un composite unidirectionnel[1]	15
2.2	Evolution du coefficient de Poisson selon l'orientation des fibres[1] .	16
2.3	Relation contrainte-déformation d'un FRP et de ses composantes [1]	17
2.4	Comportement d'un laminé multi-couches [18]	18
2.5	Colonnes renforcées à l'aide de fibres de carbone	21
2.6	Passerelle de Lunen'sche Gasse à Dusseldorf [24]	22
2.7	Exemple de câbles en FRP [23]	23
2.8	Pont de Ginzi, Bulgarie : un des premiers ponts entièrement en composite[27]	24
2.9	Passerelle d'Audubon Canyon Ranch[28]	25
2.10	Passerelle du golf d'Aberfeldy, Ecosse	25
2.11	Le Tech 21 Bridge transporté par un chariot élévateur[32]	26
2.12	Schéma de la technologie InfraCore Inside	27
2.13	Spectre de répartition des portées des passerelles répertoriées	30
2.14	Répartition géographique des ouvrages répertoriés dans le monde .	31
2.15	Répartition des ouvrages répertoriés en Europe par pays	32
2.16	Répartition des matériaux utilisés dans notre répertoire de passerelles	32
2.17	Occurrences des systèmes statiques de passerelles de plus de 25m .	34
2.18	Passerelle de Ooypoort	35
2.19	Passerelle de Lleida Pedelta	36
2.20	Passerelle de Cuenca	36
2.21	Passerelle de Fredrikstad	37

2.22	Passerelle de Grote Wetering	38
2.23	Fiberline Bridge	38
2.24	Anna Paulowna Bridge	39
2.25	Passerelle de Pontresina	40
2.26	Passerelle de Kuskovo	40
2.27	Passerelle d'Almunecar	41
3.1	CUR96 : Variables pour la formule des courbes de fatigue	54
3.2	CUR96 : Courbes σ - N pour différentes compositions de FRP avec $V_f = 55\%$ [18]	54
4.1	Schéma statique de la passerelle	60
4.2	Schéma des charges occasionnées par un véhicule de service [33]	61
4.3	Logos des logiciels SCIA et RSA	62
4.4	Passerelle reliant la gare des bus de Louvain-la-Neuve au quartier du Biéreau	63
4.5	Modèle SCIA de la solution par poutres porteuses en acier	64
4.6	Sortie du logiciel SCIA concernant l'ELU des poutres porteuses	65
4.7	Modèle SCIA du garde-corps conçu	66
4.8	Modélisation de l'assemblage garde-corps/poutre porteuse	67
4.9	Règles constructives sur les dimensions du cordon de soudure	68
4.10	Formules de calcul de résistance d'un assemblage boulonné	68
4.11	Déformation à l'ELS d'un profilé Fiberline sous $1kN/m$	71
4.12	Solution en treillis avec des profilés Fiberline	71
4.13	Déformation de la passerelle avec des profilés Strongwell à l'ELS	73
4.14	Tableau de charges pour une plaque "Fiberline MD plank"	74
4.15	Résistance à la fatigue de l'élément le plus sollicité en traction	75
4.16	Modèle RSA de la passerelle en tablier porteur	78
4.17	Modèle RSA de la déformée à l'ELS de la passerelle	79
B.1	Le cas de charge 2 représente les charges variables	131
B.2	Résumé des contraintes maximales dans les différentes sections de la passerelle	132
B.3	σ_{max} à l'ELU	132
B.4	τ_{max} à l'ELU	133
B.5	Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de $50cm$ de haut	134
B.6	Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de $55cm$ de haut	134
B.7	Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de $60cm$ de haut	135
B.8	Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de $58cm$ de haut	135
B.9	Flèches sous charges variables pour un tablier de $58cm$ de haut	135
B.10	Fréquences propre de la passerelle pour un tablier de $58cm$ de haut	136

B.11	Résumé des contraintes maximales dans les différents sections de la passerelle	137
B.12	σ_{max} à l'ELU	137
B.13	τ_{max} à l'ELU	138

Liste des tableaux

1.1	Comparaison massique des différents matériaux traditionnels de la construction	10
2.1	Propriétés de différents types de fibre [15]	12
2.2	Propriétés typiques des résines thermodures [15]	13
2.3	Valeurs type de module d'élasticité pour un FRP unidirectionnel avec 55% de fibres [1]	14
2.4	Valeurs type de résistance à la traction pour un FRP unidirectionnel avec une matrice époxy[17]	18
2.5	Propriétés mécaniques d'un composite de composition similaire selon différents modes de production[17]	19
2.6	Synthèse des ouvrages existants cfr Annexe A	33
3.1	Caractéristiques des Profilés Fiberline	47
3.2	CUR96 : Valeurs de $\gamma_{M,2}$	48
3.3	CUR96 : Application des facteur η_c dus à l'environnement	49
3.4	JRC Prospect : Valeurs de $\gamma_{M,2}$	50
3.5	JRC Prospect : Application des facteur η_c dus à l'environnement	51
3.6	Valeurs de η_{cm}	52
3.7	Fiberline guideline : Valeurs de $\gamma_{m,4}$	53
4.1	Résumé des critères d'ELS	65
4.2	Fiberline : Coefficients de sécurité	69
4.3	Valeurs caractéristiques des profilés FRP selon les recommandations	70
4.4	Coefficients appliqués selon la norme et l'état limite	77
4.5	Propriétés du FRP selon la norme et l'état limite	78

Bibliographie

- [1] Paweł Bernard POTYRAŁA. *Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures*. thèse de projet. 2011.
- [2] <https://www.carbon.ee/en/n/carbon-fiber-all-patterns-explained>. Accessed : 2019-07-29.
- [3] Henrik THORNING. *Fiberline Design Manual*. Kolding, Danemark : Fiberline Composites A/S, 2003.
- [4] <https://www.moldedfiberglass.com/processes/open-molding-process>.
- [5] <https://www.graco.com/gb/en/products/application/composites-frp/spray-up-lamination.html>.
- [6] Gebart B. R. HAMMAMI A. *Analysis of the Vacuum Infusion Molding Process*. 2000.
- [7] C. Atas A. GOREN. “Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding”. In : *Archives of Materials Science and Engineering* 34 (déc. 2008), p. 117–120.
- [8] Springer G.S. SOO-YONG L. “Filament Winding Cylinders : I. Process Model”. In : *Journal of composite materials* 24 (déc. 1990), p. 1270–1275.
- [9] <https://www.indiamart.com/proddetail/orthophthalate-polyester-resin-for-filament-winding-12529859612.html>.
- [10] Eric van UDEN. *Rules and Regulation, Hurdle or Opportunity ?* slides d’une conférence. 2016.
- [11] centre technique du bois et de L’AMEUBLEMENT. *Bois Lamellé Collé - BLC*. Brochure. 2007. URL : http://www.cilc.fr/uploads/files/1_Descriptif_bois_lamelles_colles_20.pdf.
- [12] GOODFELLOW. *Composite de Carbone/Epoxy, informations matériau*. 2019. URL : <http://www.goodfellow.com/F/Composite-de-Carbone-Epoxy.html>.

- [13] Frieder Seible LELLI VAN DEN EINDE Lei Zhao. “Use of FRP composites in civil structural applications”. In : *Construction and Building Materials* 17 (2003), p. 389–403.
- [14] Bellini C. SORRENTINO L. Esposito L. “A new methodology to evaluate the influence of curing overheating on the mechanical properties of thick FRP laminates”. In : *Composites Part B* 109 (2017), p. 187–196.
- [15] Mazumdar S. *COMPOSITES MANUFACTURING Materials, Product, and Process Engineering*. 2002.
- [16] Tuakta C. *Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures*. Mémoire. 2005.
- [17] Hollaway L.C. “Composite Materials and Structures in Civil Engineering”. In : *Comprehensive Composite Materials* 6 (2000), p. 489–527.
- [18] *CUR-Aanbeveling 96 :2017 Vezelversterkte kunststoff en in bouwkundigeen civieltechnische draagconstructies*. 2017.
- [19] Mckenzie M. “Corrosion protection : the environment created by bridge enclosure”. In : *Research Reports* 293 (1991).
- [20] Czaderski CHRISTOPH. “EBR Strengthening Technique for Concrete, Long-Term Behaviour and Historical Survey”. In : *Polymers* 10,77 (2018).
- [21] Gyoujin CHO. *7Th European Conference on Composite Materials, London, UK*. Woodhead Publishings, 1996, p. 301–302.
- [22] Meier U. “Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites”. In : *Construction and Building Materials* 9 (1995).
- [23] Clarke J.L. *Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete*. CRC Press, 1993, p. 133–134.
- [24] Edgar EI. *Düsseldorf- Angermund, Lünen’sche Gasse*. Picture. 2011.
- [25] Head P. “Use of fibre reinforced plastics in bridge structures”. In : *IABSE congress report* 13 (1988), p. 123–128.
- [26] Prestressing Concrete Structures with FRP TENDONS. Master’s Thesis. 2005.
- [27] Blaga L. “Friction Riveting (FricRiveting) as a new joining technique in GFRP lightweight bridge construction”. In : *Construction and Building Materials* 80 (2015), p. 167–179.
- [28] E.T. TECHTONICS. *AUDUBON CANYON RANCH*. 2019. URL : <https://www.ettechtonics.com/project-gallery/audubon-canyon-ranch/>.
- [29] The Happy PONTIST. *Scottish Bridges : 23. Aberfeldy Footbridge*. 2012. URL : <http://happypontist.blogspot.com/2012/07/scottish-bridges-23-aberfeldy.html>.

- [30] Skinner J.M. “A CRITICAL ANALYSIS OF THE ABERFELDY FOOT-BRIDGE, SCOTLAND”. In : *Proceedings of Bridge Engineering 2* Conference 2009 (2009).
- [31] Harvey W. “A Reinforced Plastic Footbridge, Aberfeldy, UK”. In : *Structural Engineering International* 4/93 (1993), p. 229–232.
- [32] BCEO. *Butler County Engineer’s Office*. 2019. URL : <https://www.bceo.org/index.htm>.
- [33] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 1 : Actions on structures - Part 2 : Traffic loads on bridges*. Norm. 2003.

Annexe A

Ouvrages Existants

Légende

- Orange : passerelles produites par Fiberline
- Bleu : passerelles produites par FiberCore Europe
- Vert : passerelles produites par E.T. Techtonics

Nom	Lieu	Date	Portée [m]	Statique	Matériaux	Mode de production
Ooypoort	Pays-Bas	2014	56	Arc	Verre + Polyester	Injection sous vide
Pedestrian bridge in recreation zone of "Likhoborka" (1)	Russie	2005	20	Arc	Verre + Polyester	Pultrusion
ApATeCh arched footbridge	Russie	2008	22,6	Arc	Verre + Polyester	Injection sous vide
Lleida Pedelta	Espagne	2004	38	Bowstring	Verre + Polyester	Pultrusion
Cuenca Footbridge 216m	Espagne	2011	72	Cables pré tendus	Carbone + Epoxy	
Canary Islands footbridge	Espagne	2001	24	Caisson	Verre + Polyester	Injection sous vide
INEEL Bridge	ID, Etats-Unis	1997	9,1	Caisson	Verre + Polyester	Injection sous vide
Fredrikstad Bridge	Norvege	2003	60	Caisson	Carbone + Polyester + Balsa	Injection sous vide
Smith Creek Bridge	OH, Etats-Unis	1997	10,1	Caisson	Verre + Polyester	Injection sous vide
Bio Based Bridge	Pays-Bas	2016	14	Caisson	Chanvre & lin avec resine bio	Injection sous vide
Klettgau 1	Allemagne		7	Deck	Verre + Polyester	Pultrusion
Vijsmint	Belgique	2010	14,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Shanghai	Chine	2009	11,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Bordeaux	France	2012	21,1	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Livenza	Italie	2013	17,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Five Mile Road Bridge #0171	OH, Etats-Unis	2000	13,4	Deck	Verre + Polyester	RTM
Borne 2	Pays-Bas	2011	15	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Kamerinske wetering	Pays-Bas	2011	14,9	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Twickel 2	Pays-Bas	2014	11,24	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Krimpenervaard	Pays-Bas	2007	10	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
De zuidert 5	Pays-Bas	2011	11,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Purmerend 2	Pays-Bas	2009	16	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Dongen	Pays-Bas	2014	14,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Koegelwiek	Pays-Bas	1997	15	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Ijsselmonde	Pays-Bas	2009	9,8	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Brug 252	Pays-Bas	2015	12,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
N216 2	Pays-Bas	2014	9	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Den oever	Pays-Bas	2013	8,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Aalsmeer	Pays-Bas	2012	11,1	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Hoogstraten	Pays-Bas	2012	10	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Gouderak	Pays-Bas	2013	8,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Nagelervaart 2	Pays-Bas	2011	20	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Aalsmeer	Pays-Bas	2012	14,9	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Hoogvliet	Pays-Bas	2009	14	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Eindhoven	Pays-Bas	2014	26	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Aalsmeer	Pays-Bas	2012	14,9	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Krampenloop	Pays-Bas	2011	14	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Mosselbrug	Pays-Bas	2013	13,1	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Zaanstad	Pays-Bas	2013	15,2	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Zwanenkade	Pays-Bas	2014	11,21	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
De dors	Pays-Bas	2012	9,8	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Spoorlaan	Pays-Bas	2009	13,25	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
25d25	Pays-Bas	2013	21,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Maarssenseweg	Pays-Bas	2011	6,55	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Lely maassluis	Pays-Bas	2013	10,2	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Potgiterstraat	Pays-Bas	2010	18	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Wetering heerde	Pays-Bas	2015	32	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Beverwaard	Pays-Bas	2013		Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Rozenbrug	Pays-Bas	2012	26	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Gouwebos	Pays-Bas	2014		Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Laakzone	Pays-Bas	2015	20	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Hoveniersberg	Pays-Bas	2010	12	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Neerwoldeiland	Pays-Bas	2016	15	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Exercitiesingel	Pays-Bas	2015	20	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Purmerend 3	Pays-Bas	2016	14,7	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Sommelsdijk	Pays-Bas	2012		Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Dronten	Pays-Bas	2007	21,5	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Ecoduct Rhenen	Pays-Bas	2014	24	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Deventer 3	Pays-Bas	2012	22	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Amersfoort 2	Pays-Bas	2011	17,74	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Schalkwijkkerstraat	Pays-Bas	2012	15	Deck	InfraCore Inside	Injection sous vide
Bonds Mill Lift Bridge Stroud	Royaume-Uni	1994	8,2	Deck	Verre + Polyester	Pultrusion
Pont y Ddraig	Royaume-Uni	2013	34	Deck	Carbone + Verre + Ampreg 21	Injection sous vide

Pedestrian bridge on the Highway "Starokashirskoe"	Russie	2007	5	Deck	Verre + Polyester	Injection sous vide
Bridge in Sochi	Russie	2008	12,8	Deck	Verre + Polyester	Injection sous vide
Kolding	Danemark	1997	27	Haubanné	Verre + Polyester	Pultrusion
Kolding	Danemark	1997	13	Haubanné	Verre + Polyester	Pultrusion
PWRI Demonsration Bridge	Japon	1996	11	Haubanné	Verre + Polyester	Pultrusion
Aberfeldy Golf Course Bridge	Royaume-Uni	1990	63	Haubanné	Verre + Polyester	Pultrusion
Kolkwitz	Allemagne		4,6	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Schwepnitz	Allemagne		5,5	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Norre Aadby	Danemark	2008	10	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Cueva de Oñati-Arrikrutz Walkway	Espagne	2008		Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Sealife Park Dolphin Bridge	HI, Etats-Unis	2001	11	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Clear Creek Bridge	KY, Etats-Unis	1996	18,3	Poutres porteuses	Carbone + Verre + Vinylester	Pultrusion
Anna paulowna	Pays-Bas	2011	23	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
West Mill Bridge over River Cole	Royaume-Uni	2002	10	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Pedestrian bridge in recreation zone of "Likhoborka" (2)	Russie	2006	11,2	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Pedestrian bridge in recreation zone of "Likhoborka" (3)	Russie	2006	11,2	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Pedestrian bridge in recreation zone of "Likhoborka" (4)	Russie	2006	25	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Pedestrian bridge in recreation zone of "Likhoborka" (5)	Russie	2007	20	Poutres porteuses	Verre + Polyester	Pultrusion
Windy creek	AK, Etats-Unis		14	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Audubon canyon ranch	CA, Etats-Unis		29	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Redwoods	CA, Etats-Unis		24	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Hyatt Islandia	CA, Etats-Unis		20	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Point bonita lighthouse	CA, Etats-Unis		21	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Rodeo beach	CA, Etats-Unis		18	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Chenjiawan Bridge	Chine	1988	11,2	Treillis	Verre + Polyester	Empilement
Sachem yacht club	CT, Etats-Unis		16,5	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Ferry Pier	Danemark	2000	13,5	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Ferry Pier	Danemark	2000	13,5	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Coventry Park	DE, Etats-Unis		9	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Trivalley	DE, Etats-Unis		20	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Tates hell	FL, Etats-Unis		12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Monkey creek	FL, Etats-Unis		24	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Haleakala NP	HI, Etats-Unis		24	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Haleakala NP	HI, Etats-Unis		12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Juan solomon	IN, Etats-Unis		30	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Roland park country school	MD, Etats-Unis		12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Woodstock	MD, Etats-Unis		12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Woodstock	MD, Etats-Unis		12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Bridge supp off existing railroad	MI, Etats-Unis		8	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Manitou river	MN, Etats-Unis		15	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Blue ridge parkway	NC, Etats-Unis		11	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Sugarite state park	NM, Etats-Unis		12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Popolepen creek	NY, Etats-Unis		19	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Middlebury	OH, Etats-Unis		17,5	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Owens corning	OH, Etats-Unis		13	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Tualatin wildlife	OR, Etats-Unis		24	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Mcdade trail	PA, Etats-Unis		12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Dingham Falls	PA, Etats-Unis		24	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Mcdade trail	PA, Etats-Unis		29	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Hopewell dam	PA, Etats-Unis		16	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Pine grove furnace state park	PA, Etats-Unis		16,5	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Promised land state park	PA, Etats-Unis		19	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Loyalsock Township	PA, Etats-Unis		18	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Earlsburn 1	Royaume-Uni	2013	13	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Earlsburn 2	Royaume-Uni	2013	12	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Pedestrian bridge near the platform "Chertanovo"	Russie	2004	15	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Pedestrian bridge over the platform "Kosino"	Russie	2005	23	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion
Pedestrian bridge over the platform "Testovskaya"	Russie	2007	16	Treillis	Verre + Polyester	Pultrusion

Annexe B

Notes de calcul

B.1 Solution Acier

B.1.1 ELU - poutres porteuses - IPE 600

Contrôle ELU EC-EN 1993

Calcul linéaire

Combinaison: ELU-Set B (auto)

Système de coordonnées: Principal

Extrême 1D: Elément

Sélection: B2

Contrôle EN 1993-1-1

Annexe nationale: AN belge NBN-EN

Elément B2 | **7,000 / 15,000 m** | **IPE600** | **S 355** | **ELU-Set B (auto)** | **0,92 -**

Clé des combinaisons

ELU-Set B (auto) / 1.35*LC1 + 1.50*LC2 + 1.50*LC3

Coeff. partiels de sécurité

γ_{M0} pour la résistance des sections	1,00
γ_{M1} pour la résistance en stabilité	1,00
γ_{M2} pour la résistance en section nette	1,25

Matériau

Limite élastique f_y	355,0	MPa
Résistance ultime f_u	490,0	MPa
Fabrication	Laminé	

.....CONTRÔLE EN SECTION:....

La position du contrôle critique est 7,000 m

Efforts internes	Calculé	Unité
N_{Ed}	13,41	kN
$V_{y,Ed}$	0,26	kN
$V_{z,Ed}$	8,12	kN
T_{Ed}	-0,03	kNm
$M_{y,Ed}$	1120,54	kNm
$M_{z,Ed}$	0,04	kNm

Classification pour le contrôle en section

Classification selon EN 1993-1-1 article 5.5.2

Classification des parties internes et libres selon EN 1993-1-1 Tableau 5.2 page 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	80	19	-3,543e+05	-3,544e+05								
3	SO	80	19	-3,543e+05	-3,542e+05								
4	I	514	12	-3,135e+05	3,118e+05	-1,01		0,50	42,83	58,94	67,95	101,44	1
5	SO	80	19	3,526e+05	3,527e+05	1,00	0,43	1,00	4,21	7,32	8,14	11,20	1
7	SO	80	19	3,525e+05	3,525e+05	1,00	0,43	1,00	4,21	7,32	8,14	11,22	1

Note: Note: Les limites de classification ont été définies conformément à Semi-Comp+

La section est classée en Classe 1

Contrôle traction

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.3 et formule (6.5)

A	1,5600e-02	m ²
$N_{pl,Rd}$	5538,00	kN
$N_{u,Rd}$	5503,68	kN
$N_{t,Rd}$	5503,68	kN
Contrôle unité	0,00	-

Contrôle du moment de flexion pour M_y

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.5 et formule (6.12),(6.13)

$W_{pl,y}$	3,5120e-03	m ³
$M_{pl,y,Rd}$	1246,76	kNm
Contrôle unité	0,90	-

Contrôle du moment de flexion pour M_z

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.5 et formule (6.12),(6.13)

$W_{pl,z}$	4,8600e-04	m ³
$M_{pl,z,Rd}$	172,53	kNm
Contrôle unité	0,00	-

Contrôle à l'effort tranchant pour V_y

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 et formule (6.17)

η	1,20	
A_v	8,7920e-03	m ²
$V_{pl,y,Rd}$	1802,00	kN
Contrôle unité	0,00	-

Contrôle à l'effort tranchant pour V_z

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.6 et formule (6.17)

η	1,20	
A_v	8,3800e-03	m ²
$V_{pl,z,Rd}$	1717,56	kN
Contrôle unité	0,00	-

Contrôle torsion

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.7 et formule (6.23)

Fibre	15	
T_{Ed}	0,3	MPa
T_{Rd}	205,0	MPa
Contrôle unité	0,00	-

Note: Le contrôle unité de torsion est inférieur à la valeur limite 0,05. Par conséquent la torsion est considérée comme négligeable et est ignorée dans les contrôles combinés.

Contrôle combiné flexion, effort normal et effort tranchant

Selon EN 1993-1-1 article 6.2.9.1 et formule (6.41)

$M_{pl,y,Rd}$	1246,76	kNm
α	2,00	
$M_{pl,z,Rd}$	172,53	kNm
β	1,00	

Contrôle unité (6.41) = $0,81 + 0,00 = 0,81$ -

Note: Les efforts tranchants sont inférieurs à la moitié de la résistance plastique à l'effort tranchant. Par conséquent, leur influence sur les moments résistants est négligée.

Note: Puisque l'effort normal satisfait les deux critères (6.33) et (6.34) de l'EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) son effet sur le moment résistant selon l'axe y-y est négligé.

Note: Puisque l'effort normal satisfait le critère (6.35) de l'EN 1993-1-1 article 6.2.9.1(4) son effet sur le moment résistant selon l'axe z-z est négligé.

L'élément satisfait le contrôle en section.

....:CONTRÔLE DE STABILITÉ:....

Classification pour le contrôle de stabilité

Position déterminante pour la classification pour la stabilité : 7,000 m

Classification selon EN 1993-1-1 article 5.5.2

Classification des parties internes et libres selon EN 1993-1-1 Tableau 5.2 page 1 & 2

Id	Type	c [mm]	t [mm]	σ_1 [kN/m ²]	σ_2 [kN/m ²]	ψ [-]	k_σ [-]	α [-]	c/t [-]	Limite classe 1 [-]	Limite de Classe 2 [-]	Limite de Classe 3 [-]	Classe
1	SO	80	19	-3,543e+05	-3,544e+05								
3	SO	80	19	-3,543e+05	-3,542e+05								
4	I	514	12	-3,135e+05	3,118e+05	-1,01		0,50	42,83	58,94	67,95	101,44	1
5	SO	80	19	3,526e+05	3,527e+05	1,00	0,43	1,00	4,21	7,32	8,14	11,20	1
7	SO	80	19	3,525e+05	3,525e+05	1,00	0,43	1,00	4,21	7,32	8,14	11,22	1

Note: Note: Les limites de classification ont été définies conformément à Semi-Comp+
La section est classée en Classe 1

Contrôle de déversement

Selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 & 6.3.2.3 et formule (6.54)

Paramètres de déversement		
Méthode pour la courbe de déversement	Cas alternatif	
Module de section plastique $W_{pl,y}$	3,5120e-03	m ³
Moment critique élastique M_{cr}	20718,68	kNm
Elancement relatif $\lambda_{rel,LT}$	0,25	
Elancement limite $\lambda_{rel,LT,0}$	0,20	
Courbe de déversement	c	
Imperfection α_{LT}	0,49	
Coefficient de déversement β	1,00	
Coefficient de réduction χ_{LT}	0,98	
Coefficient de correction k_c	1,00	
Coefficient de correction f	1,00	
Coefficient de réduction modifié $\chi_{LT,mod}$	0,98	
Résistance de calcul au flambement $M_{b,Rd}$	1218,83	kNm
Contrôle unité	0,92	-

Paramètres M_{cr}		
Longueur de déversement l_{LT}	1,000	m
Infl. pos. des charges	pas d'influence	
Coefficient de correction k	1,00	
Coefficient de correction k_w	1,00	
Coefficient de moment de déversement C_1	1,01	
Coefficient de moment de déversement C_2	0,00	
Coefficient de moment de déversement C_3	1,00	
Distance du centre de cisaillement d_z	0	mm
Distance du point d'application de la charge z_g	0	mm
Constante de mono symétrie β_y	0	mm

Paramètres Mcr		
Constante de mono-symétrie z_j	0	mm

Note: Les paramètres C sont déterminés selon l'ECCS 119 2006 / Galea 2002.

Note: Le coefficient de correction k_c est déterminé à partir de C_1 .

Contrôle en flexion composée avec traction

Selon EN 1993-1-3 article 6.3

Force de traction de calcul N_{Ed}	13,41	kN
Moment de flexion de calcul $M_{y,Ed}$	1120,54	kNm
Moment de flexion de calcul $M_{z,Ed}$	0,04	kNm
Résistance en traction $N_{t,Rd}$	5503,68	kN
Résistance à la flexion $M_{b,y,Rd}$	1218,83	kNm
Résistance à la flexion $M_{c,z,Rd,com}$	172,53	kNm

Contrôle unité = $0,92 + 0,00 - 0,00 = 0,92$ -

Contrôle du voilement

Selon EN 1993-1-5 article 5 & 7.1 et formule (5.10) & (7.1)

Paramètres de voilement		
Longueur du panneau d'âme a	15,000	m
âme	non raidie	
Hauteur d'âme h_w	562	mm
Epaisseur d'âme t	12	mm
Coefficient de matériau ϵ	0,81	
Coefficient de correction pour le cisaillement η	1,20	

Vérification du voilement	
Elancement âme h_w/t	46,83
Elancement limite de l'âme	48,82

Note: L'élancement de l'âme est tel que les effets de voilement peuvent être ignorés selon EN 1993-1-5 article 5.1(2).

L'élément satisfait le contrôle de stabilité

B.1.2 Fréquences propres de la structure

Fréquences propres

N	f [Hz]	ω [1/s]	ω^2 [1/s ²]	T [s]
Combinaison masse : CM1				
1	3,20	20,12	404,88	0,31
2	7,76	48,76	2377,15	0,13
3	11,54	72,51	5257,04	0,09
4	12,08	75,91	5762,76	0,08
5	21,62	135,83	18449,95	0,05
6	21,71	136,38	18600,84	0,05
7	26,83	168,59	28423,64	0,04
8	32,98	207,22	42939,86	0,03
9	39,60	248,80	61899,24	0,03
10	42,85	269,22	72478,91	0,02

B.2 Solution Composite 1

B.2.1 Références profilés Strongwell

STRONGWELL®

AVAILABILITY LIST

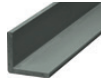
(METRIC)

EXTREN® Structural Shapes and Plate.....	2
Special Composite Shapes	4
DURADEK® Pultruded Grating.....	6
DURAGRATE® Molded Grating	8
DURATREAD™ Molded Stair Tread Covers.....	9
SAFRAIL™ Industrial Railing Systems.....	9
CUSTOM Handrail Systems	10
Baffle Wall Panels	11
COMPOSOLITE® Building Panel System	11
DURASHIELD® Foam Core Building Panel System	11
DURASHIELD HC® Hollow Core Building Panel System.....	11
SAFPLANK® Interlocking Decking System	12
SAFDECK® Overlapping Decking System	12
STRONGDEK™ Architectural Decking System	12
FIBREBOLT® Studs and Nuts	12
HS ARMOR PANEL Ballistic Panel.....	13
General Information	14

EXTREN

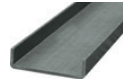
FIBERGLASS STRUCTURAL SHAPES & PLATE

ANGLE



SIZES IN mm	LENGTH IN m	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	kg PER LIN. m
25.4 x 3.18	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	0.27
31.75 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.36
31.75 x 4.76	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	0.52
38.1 x 3.18	6.1	NS	STOCKED	NS	0.43
38.1 x 4.76	-	NS	NS	NS	0.64
38.1 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	0.83
50.8 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.60
50.8 x 4.76	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	0.88
50.8 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	1.15
66.68 x 41.28 x 4.76	-	NS	NS	NS	0.91
76.2 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	1.77
76.2 x 9.53	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	2.62
76.2 x 25.4 x 4.76	-	NS	NS	NS	0.99
101.6 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	2.40
101.6 x 9.53	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	3.56
101.6 x 12.7	6.1	NS	STOCKED	STOCKED	4.69
117.48 x 41.28 x 4.76	-	NS	NS	NS	1.36
101.6 x 1.67 x 4.76	-	NS	NS	NS	1.22
127 x 12.7	-	NS	NS	NS	5.89
152.4 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	NS	3.68
152.4 x 9.53	6.1	NS	STOCKED	NS	5.43
152.4 x 12.7	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	7.14
168.28 x 41.28 x 4.76	-	NS	NS	NS	1.81
152.4 x 41.28 x 4.76	-	NS	NS	NS	1.67
219.08 x 41.28 x 4.76	-	NS	NS	NS	2.11

CHANNEL



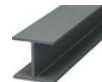
SIZES IN mm	LENGTH IN m	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	kg PER LIN. m
38.1 x 25.4 x 4.76	-	NS	NS	NS	0.74
38.1 x 38.1 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	NS	1.25
50.8 x 14.29 x 3.18	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	0.43
50.8 x 22.23 x 6.35	-	NS	NS	NS	1.00
66.68 x 3.18 x 31.75 x 4.76	-	NS	NS	NS	0.94
76.2 x 22.23 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	0.84
76.2 x 25.4 x 4.76	-	NS	NS	NS	1.25
76.2 x 38.1 x 6.35	-	NS	NS	NS	1.64
88.9 x 38.1 x 4.76	6.1	NS	STOCKED	NS	1.38
101.6 x 26.99 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.89
101.6 x 28.58 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	1.73
101.6 x 34.93 x 4.76	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	1.44
127 x 34.93 x 6.35	-	NS	NS	NS	2.20
139.7 x 38.1 x 4.76	6.1	NS	STOCKED	NS	1.86
139.7 x 38.1 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	NS	2.50
152.4 x 41.28 x 4.76	-	NS	NS	NS	1.67
152.4 x 42.55 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	2.66
152.4 x 42.86 x 9.53	6.1	NS	STOCKED	NS	4.03
203.2 x 55.56 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	NS	3.71
203.2 x 55.56 x 9.53	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	5.45
254 x 69.85 x 12.7	6.1	NS	STOCKED	STOCKED	8.18
254 x 69.85 x 12.7	7.3	NS	STOCKED	STOCKED	9.06
304.8 x 76.2 x 12.7	-	NS	NS	NS	8.43
304.8 x 76.2 x 12.7	7.3	NS	STOCKED	STOCKED	10.21
355.6 x 88.9 x 19.05	-	NS	NS	NS	18.27
457.2 x 55.56 x 4.76	-	NS	NS	NS	5.18
609.6 x 76.2 x 6.35	-	NS	NS	NS	9.49

I-BEAM



SIZES IN mm	LENGTH IN m	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	kg PER LIN. m
50.8 x 25.4 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.58
76.2 x 38.1 x 6.35	-	NS	NS	NS	1.73
101.6 x 50.8 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	2.37
139.7 x 63.5 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	NS	3.10
152.4 x 76.2 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	NS	3.60
152.4 x 76.2 x 9.53	-	NS	NS	NS	5.28
152.4 x 101.6 x 6.35	-	NS	NS	NS	4.11
203.2 x 101.6 x 9.53	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	7.16
203.2 x 101.6 x 12.7	-	NS	NS	NS	9.39
254 x 127 x 9.53	-	NS	NS	NS	9.03
254 x 127 x 12.7	6.1	NS	STOCKED	NS	11.89
304.8 x 152.4 x 12.7	6.1	NS	STOCKED	STOCKED	14.39
304.8 x 152.4 x 12.7	7.3	NS	STOCKED	STOCKED	14.39
457.2 x 9.53 x 114.3 x 12.7	-	NS	NS	NS	13.87
609.6 x 9.53 x 190.5 x 19.05	7.3	NS	STOCKED	NS	24.88

WIDE FLANGE BEAM



SIZES IN mm	LENGTH IN m	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	kg PER LIN. m
50.8 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.77
76.2 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	2.51
101.6 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	3.30
101.6 x 9.53	-	NS	NS	NS	4.95
152.4 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	5.24
152.4 x 9.53	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	7.63
203.2 x 9.53	6.1	NS	STOCKED	STOCKED	10.37
203.2 x 12.7	6.1	NS	STOCKED	STOCKED	13.74
254 x 9.53	6.1	NS	NS	STOCKED	13.07
254 x 9.53	9.75	NS	STOCKED	STOCKED	10.29
254 x 12.7	-	NS	NS	NS	17.68
304.8 x 12.7	-	NS	NS	NS	20.80
304.8 x 12.7	7.3	NS	NS	STOCKED	20.80

Series 500 - Polyester resin, olive green

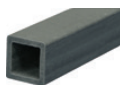
Series 525 - Polyester resin, flame retardant, slate gray

Series 625 - Vinyl Ester resin, flame retardant, beige

■ Items are non-stocked items

NOTE: Inventory of nonstocked items may be available due to overruns.

SQUARE TUBE



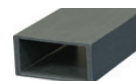
SIZES IN mm	LENGTH IN m	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	kg PER LIN. m
25.4 x 3.18	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	0.49
31.75 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.61
38.1 x 3.18	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	0.82
38.1 x 6.35	-	NS	NS	NS	1.46
44.45 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.95
44.45 x 6.35	-	NS	NS	NS	1.77
50.8 x 3.18	6.1	NS	STOCKED	NS	1.10
50.8 x 6.35 ‡	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	2.08
63.5 x 6.35	-	NS	NS	NS	2.66
76.2 x 3.18	-	NS	NS	NS	1.73
76.2 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	3.27
76.2 x 9.53	-	NS	NS	NS	4.76
88.9 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	STOCKED	3.67
101.6 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	STOCKED	4.58
101.6 x 9.53	-	NS	NS	NS	6.55
152.4 x 9.53	6.1	NS	STOCKED	NS	9.79

ROUND TUBE



SIZES IN mm	LENGTH IN m	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	kg PER LIN. m
25.4 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.37
31.75 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.48
38.1 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.67
38.1 x 6.35	-	NS	NS	NS	1.18
44.45 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.70
44.45 x 6.35	-	NS	NS	NS	1.40
50.8 x 3.18	-	NS	NS	NS	0.89
50.8 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	1.64
63.5 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	2.13
76.2 x 6.35	-	NS	NS	NS	2.53
88.9 x 3.56	-	NS	NS	NS	1.80
101.6 x 6.35	-	NS	NS	NS	3.51
127 x 6.35	-	NS	NS	NS	4.58
152.4 x 3.18	-	NS	NS	NS	2.74
152.4 x 6.35	-	NS	NS	NS	5.60

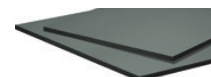
RECTANGULAR TUBE



SIZES IN mm	LENGTH IN m	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	kg PER LIN. m
63.5 x 41.28 x 3.18	-	NS	NS	NS	1.10
101.6 x 3.18 x 50.8 x 6.35	6.1	STOCKED	STOCKED	NS	2.26
88.9 x 139.7 x 6.35	6.1	NS	STOCKED	NS	5.00
165.1 x 6.35 x 50.8 x 12.7	-	NS	NS	NS	5.61
177.8 x 101.6 x 6.35	-	NS	NS	NS	6.27
228.6 x 152.4 x 7.94	-	NS	NS	NS	10.28
228.6 x 152.4 x 11.11	-	NS	NS	NS	14.26

PLATE

EXTREN® plate is a stocked item and is usually available on short notice. Stock size is 1.22m x 2.44m. 1.52m wide plate is also available, non-stocked. Other sizes are available and will be quoted upon request.



THICKNESS IN mm	SERIES 500	SERIES 525	SERIES 625	WEIGHT kg PER m²
3.18	STOCKED	STOCKED	STOCKED	5.57
4.76	STOCKED	NS	NS	8.35
6.35	STOCKED	STOCKED	STOCKED	11.42
9.53	STOCKED	STOCKED	NS	18.86
12.7	STOCKED	STOCKED	STOCKED	22.85
15.88	NS	NS	NS	28.27
19.05	STOCKED	STOCKED	STOCKED	33.88
25.4	NS	STOCKED	STOCKED	45.26

‡ Also stocked in Series 525 yellow
 Items are non-stocked items

Series 500 - Polyester resin, olive green
 Series 525 - Polyester resin, flame retardant, slate gray
 Series 625 - Vinyl Ester resin, flame retardant, beige

NOTE: Inventory of nonstocked items may be available due to overruns.

EXTREN TC® ROD AND BAR

THERMAL CURE ROD AND BAR is produced using all longitudinal reinforcements with low speed and high temperature, which provides a rich surface appearance. It has no surfacing veil, no pigment and is not fire retardant. On request, Strongwell can quote special formulations including resin type, fire retardant properties, etc. Because it maintains high electrical standards, thermal cure rod is most commonly specified for electrical applications. Normally stocked for prompt delivery. *Thermal cure rod and bar was not designed to be machined.*

ROUND ROD*



SIZES IN mm	THERMAL CURE	kg PER LIN. m
6.35	STOCKED	0.06
7.94	STOCKED	0.10
9.53	STOCKED	0.15
12.7	STOCKED	0.25
15.88	STOCKED	0.40
19.05	STOCKED	0.58
20.64	NS	0.67
22.23	NS	0.79
25.4	STOCKED	1.03
28.58	NS	1.29
31.75	NS	1.61
38.1	STOCKED	2.26
50.8	NS	4.18

SQUARE ROD*



SIZES IN mm	THERMAL CURE	kg PER LIN. m
12.7	STOCKED	0.33
15.88	STOCKED	0.51
19.05	NS	0.73
25.4	STOCKED	1.29
31.75	NS	1.95
38.1	STOCKED	2.90

Sizes 19.05mm diameter and smaller will be stocked in Chatfield, MN

SPECIAL COMPOSITE SHAPES

(SPECIAL COMPOSITE DESIGN — NOT EXTREN® COMPOSITE)

All Special Composite Shapes are Non-stocked items unless otherwise noted.

Tooling is available for the following special non-stocked items - Sizes in mm



TOP RAIL

50.8 x 6.35 Modified Rd Tube

PE

PE/FR

VE/FR

kg PER LIN. m

NS

NS

NS

1.92



FLIGHT CHANNEL

133.35 x 3.18 x 63.5 x 4.76

NS

NS

NS

2.35

180.98 x 3.18 x 63.5 x 4.76

NS

NS

NS

2.41



CHANNEL

88.9 x 50.4 x 5.56

NS

STOCKED

NS

2.05

47.63 x 3.18 x 28.58 x 4.78**

NS

NS

NS

0.71

83.57 x 3.25 x 29.97 x 4.83**

NS

NS

NS

0.97

84.07 x 3.43 x 30.15 x 5.33**

NS

NS

NS

1.03

101.6 x 3.18 x 44.45 x 4.75**

NS

NS

NS

1.40



STRUT

41.28 x 41.28 x 3.97 - Type 1

NS

NS

NS

0.97

41.28 x 41.28 x 3.97 - Type 2

NS

NS

NS

1.04

41.28 x 41.28 x 3.97 - Double Strut

NS

NS

NS

1.86

41.28 x 25.4 x 3.97

NS

NS

NS

0.76

41.28 x 25.4 x 3.97 - Double Strut

NS

NS

NS

1.32

All items are stocked in 6.10m lengths unless otherwise noted

NS Items are non-stocked items

* Special Composite Design - Not EXTREN® Composite

** Non-stocked item; standard color - orange

SPECIAL COMPOSITE SHAPES

(SPECIAL COMPOSITE DESIGN — NOT EXTREN® COMPOSITE)

All Special Composite Shapes are Non-stocked items unless otherwise noted.

Tooling is available for the following special non-stocked items - Sizes in mm

	PE	PE/FR	VE/FR	kg PER LIN. m
 SQUARE TUBE/ROUND HOLE				
25.4 Sq. with 19.05 Rd. Hole - Type 1	NS	NS	NS	0.73
25.4 Sq. with 19.05 Rd. Hole - Type 2	NS	NS	NS	0.73
 SLIDE GUIDE				
63.5 x 57.15 x 6.35	NS	NS	NS	1.68
 ANGLE				
44.45 x 31.75 x 6.35	NS	NS	NS	0.79
266.7 x 266.7 x 31.75	NS	NS	NS	30.95
 FLAT STRIP				
50.8 x 4.76*	NS	STOCKED	STOCKED	0.33
50.8 x 6.35	NS	NS	NS	0.58
76.2 x 4.76	NS	NS	NS	0.61
76.2 x 6.35	NS	STOCKED	NS	0.88
76.2 x 9.53	NS	NS	NS	1.34
76.2 x 12.7	NS	STOCKED	NS	1.68
88.9 x 12.7	NS	NS	NS	2.01
101.6 x 9.53	NS	NS	NS	1.73
101.6 x 12.7	NS	NS	NS	2.44
127 x 1.47	NS	NS	NS	0.39
152.4 x 3.18	NS	NS	NS	0.86
152.4 x 6.35	NS	NS	NS	1.92
 FLUTED TUBE				
31.75**	NS	NS	STOCKED	0.60
 F-SECTION				
139.7 x 25.4 x 6.35***	NS	NS	NS	2.35
152.4 x 38.1 x 6.35	NS	NS	NS	2.51
 Z-SECTION				
31.75 x 63.5 x 3.18	NS	NS	NS	0.73
 CORNER POST				
82.55 X 6.35	NS	NS	NS	3.50

All items are stocked in 6.10m lengths unless otherwise noted

 Items are non-stocked items

* Stocked item in yellow in 7.32m lengths

** Stocked item in yellow in 6.15m lengths

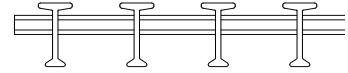
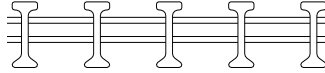
*** Stocked in Chatfield, MN

DURA DEK®

PULTRUDED FIBERGLASS GRATING

STOCKING LEVELS OF GRATING MAY VARY. CALL FOR AVAILABILITY.

STANDARD SIZE PANELS



PANEL SIZE (WIDTH X LENGTH)	PE I-6500 - 25.4mm VE I-6500 - 25.4mm	PE I-6500 - 38.1mm VE I-6500 - 38.1mm	PE T-5800 - 50.8mm VE T-5800 - 50.8mm
	WT. (kg)	WT. (kg)	WT. (kg)
0.91m x 3.05m	29.94	36.74	-
0.91m x 6.10m	59.87	73.48	70.76
1.22m x 2.44m	31.93	39.19	-
1.22m x 3.66m	47.90	58.79	56.61
1.22m x 6.10m	79.83	97.98	94.35
1.52m x 3.05m	49.90	61.24	61.24
1.52m x 6.10m	99.79	122.47	117.93

Colors: Yellow or Gray
Resins: Fire Retardant Polyester - Standard
 Fire Retardant Vinyl Ester - Optional

UV Protection: UV Inhibited with a Veil
Top Surface: Epoxy Bonded Grit Coating
Cross Rods: 203.2mm o.c.

DURA DEK®

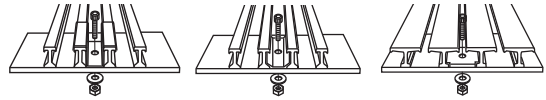
PULTRUDED FIBERGLASS GRATING

ACCESSORY ITEMS

ALL ITEMS GENERALLY ARE IN INVENTORY FOR IMMEDIATE SHIPMENT

PANEL HOLD DOWNS

(Price Does Not Include Nuts, Bolts & Washers)



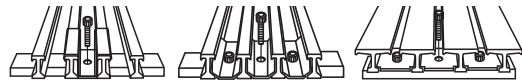
(No Broken Packages)

kg APPROX.
(25 PER PACKAGE)

S.S. Insert Hold Down, all series (Specify I-6500 or T-5800)	0.45
S.S. Saddle Clip Only, I-6500 - 25.4mm	0.91
S.S. Saddle Clip Only, I-6500 - 38.1mm	1.02
S.S. Saddle Clip Only, T-5800 - 50.8mm	1.47
6.35mm - 20 x 31.75mm S.S. Socket Head Cap Screw with Nut & Washer (For use with Hold Downs)	0.34

PANEL CONNECTORS ASSEMBLY

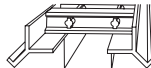
(Assembly includes Hold Down(s), Bolt(s) and Bottom Bar)



kg
APPROX.

S.S. Insert Panel Connector, all series	0.18
S.S. Saddle Clip Panel Connector, I-6500 - 25.4mm	0.13
S.S. Saddle Clip Panel Connector, I-6500 - 38.1mm	0.14
S.S. Saddle Clip Panel Connector, T-5800 - 50.8mm	0.14

FIBERGLASS CURB ANGLE



	LENGTH IN m		kg APPROX. PER LIN. m
25.4mm x 38.1mm	6.1	STOCKED	1.24
38.1mm x 38.1mm	6.1	STOCKED	1.38
50.8mm x 38.1mm	6.1	STOCKED	1.53
101.6mm x 57.15mm x 6.35mm (Slate Gray)	-	NS	7.93

Color: Gray
Resin: Fire Retardant, Vinyl Ester

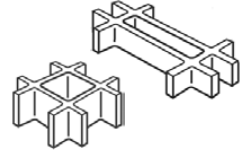
UV Inhibited with a Veil

MISCELLANEOUS

	kg APPROX.
Sealing Kit - 473.18 ml	0.74
177.8mm Tungston Carbide Tip Circular Blade	0.29
Tungston Carbide Tip Saber Saw Blade	0.01

DURACRATE®

MOLDED FIBERGLASS GRATING



STOCKING LEVELS OF GRATING MAY VARY. CALL FOR PRICING, COLOR OPTIONS AND AVAILABILITY.

RESINS OPTIONS:

GP — GENERAL POLYESTER RESIN SYSTEM
PP — PREMIUM POLYESTER RESIN SYSTEM

VE — VINYL ESTER RESIN SYSTEM
FF — FOOD GRADE RESIN SYSTEM

THICKNESS (mm)	MESH (mm)	PANEL SIZE (m)	ESTIMATED WEIGHT (kg)
25.4	25.4 x 101.6	0.91 x 3.05	38.10
25.4	25.4 x 101.6	1.22 x 2.44	40.82
25.4	25.4 x 101.6	1.22 x 3.66	61.24
25.4	38.1 x 38.1	0.91 x 3.05	35.38
25.4	38.1 x 38.1	1.22 x 2.44	37.65
25.4	38.1 x 38.1	1.22 x 3.66	56.70
38.1	38.1 x 38.1	0.91 x 3.05	51.71
38.1	38.1 x 38.1	1.22 x 2.44	55.34
38.1	38.1 x 38.1	1.22 x 3.66	83.01
50.8	50.8 x 50.8	1.22 x 3.66	87.09

STAIR TREAD*

38.1	38.1 x 152.4	0.57 x 3.05	27.22
------	--------------	-------------	-------

***NOTE:** Nosing is gritted and same color as stair tread.

• Other resins, colors and accessories available on special orders. Call factory for details.

ACCESSORY ITEMS

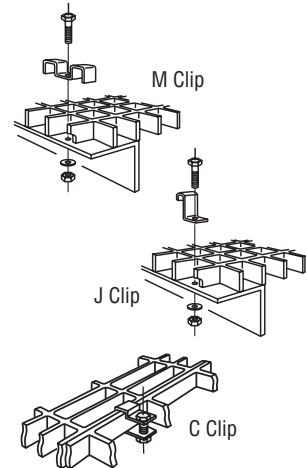
ITEM

(NO BROKEN PACKAGES)

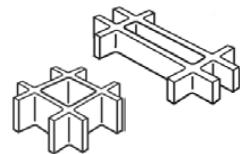
- Type M Clip for 25.4mm x 25.4mm x 101.6mm Rectangular Mesh ② or ③
- Type M Clip for 25.4mm x 38.1mm Square Mesh ② or ③
- Type M Clip for 38.1mm x 38.1mm Square Mesh ⑤
- Type M Clip Deep for 38.1mm x 38.1mm Square Mesh or 38.1mm x 152.4mm Rectangular Mesh ④
- Type M Clip for 50.8mm x 50.8mm Square Mesh ⑥
- Type J Clip for 25.4mm ①
- Type J Clip for 38.1mm ①
- Type J Clip for 50.8mm ①
- Type C Clip Assembly for 25.4mm
- Type C Clip Assembly for 38.1mm
- Type C Clip Assembly for 50.8mm

TYPICAL BOLTS TO USE FOR CLIPS:

- ① 6.35mm x 25.4mm Hex Head Cap Screw with Nut and Washer
- ② 6.35mm x 38.1mm Hex Head Cap Screw with Nut and Washer
- ③ 6.35mm x 44.45mm Hex Head Cap Screw with Nut and Washer
- ④ 6.35mm x 31.75mm Socket Head Cap Screw with Nut and Washer
- ⑤ 6.35mm x 50.8mm Hex Head Cap Screw with Nut and Washer
- ⑥ 6.35mm x 63.5mm Hex Head Cap Screw with Nut and Washer



(ALL CLIPS AND BOLTS S.S. 316)



DURATREAD™

MOLDED FIBERGLASS STAIR TREAD COVERS

STOCKING LEVELS MAY VARY. CALL FOR PRICING, COLOR OPTIONS AND AVAILABILITY.

RESINS OPTIONS:

GP — GENERAL POLYESTER RESIN SYSTEM	VE — VINYL ESTER RESIN SYSTEM
PP — PREMIUM POLYESTER RESIN SYSTEM	FF — FOOD GRADE RESIN SYSTEM

TREAD (mm)	THICKNESS 3.18mm WEIGHT (kg)	THICKNESS 6.35mm WEIGHT (kg)
203.2	7.26	14.06
228.6	8.16	15.42
254	8.62	16.78
279.4	9.53	18.14
304.8	10.43	19.96

**All covers are 3.66m long. • No minimum on black with yellow nose covers. • The minimum order quantity for all other colors is 5 pieces.*

SAF RAIL™

INDUSTRIAL FIBERGLASS RAILING SYSTEMS

ALL ITEMS GENERALLY ARE IN INVENTORY FOR IMMEDIATE SHIPMENT

SQUARE RAILING SYSTEM COMPONENTS

COMPONENT	WEIGHT (kg)
50.8mm x 50.8mm x 3.96mm Square Tube, Yellow Polyester Fire Retardant UV Inhibited @ 6.10m	1.41 / m
60.33mm x 60.33mm x 4.76mm Square Tube, Yellow Polyester Fire Retardant UV Inhibited @ 6.10m	2.02 / m
101.6 Kickplate Yellow Polyester Fire Retardant UV Inhibited @ 6.10m	0.97 / m
152.4 Kickplate Yellow Polyester Fire Retardant UV Inhibited @ 6.10m (365.76m mill run)	1.09 / m
Black End Caps	0.01 ea.
Adjustable Corner Assembly (Total Assembly)	0.16 ea.
90° Corner Plug	0.16 ea.
Kickplate Splice	0.05 ea.
Kickplate 90° Splice	0.07 ea.
Split Tube 203.2mm Length (for square handrail)	0.16 ea.
Split Tube 101.6mm Length (for square handrail)	0.08 ea.
Split Tube 3.66m Length (for square handrail)	2.78 ea.
152.4mm Square Plug	0.34 ea.
Square Plug 3.66m Length	8.27 ea.
3.18mm x 38.1mm Tension Pins	.02 / 10 pcs.
Epoxy Kits - 473.18 ml Clear	0.74 ea.
FRP Base Plate with Post - Total Height 1.02m (Polyester)	2.49 ea.
Alternate Handrail Post, 60.33mm x 60.33mm x 1.27m, Routed Out, No Bottom Plugs	2.59 ea.
90° Corner Sample	0.59 ea.
Tee Sample	0.41 ea.

NOTE: *UV Coating is recommended for exterior applications and is available at an additional cost.*

SAF RAIL™

INDUSTRIAL FIBERGLASS RAILING SYSTEMS

ALL ITEMS GENERALLY ARE IN INVENTORY FOR IMMEDIATE SHIPMENT



ROUND RAILING SYSTEM COMPONENTS

COMPONENT	WEIGHT (kg)
48.26mm OD x 38.1mm ID Yellow Polyester Fire Retardant UV Inhibited	1.31 / m
101.6mm Kickplate Yellow Polyester Fire Retardant UV Inhibited @ 6.10m	0.97 / m
Black End Caps	0.02 ea.
Adjustable Corner Assembly (Total Assembly)	0.16 ea.
90° Corner Assembly	0.16 ea.
Intermediate Connectors	0.02 ea.
Kickplate Splice	0.05 ea.
Kickplate 90° Splice	0.07 ea.
Split Tube, 38.1mm x 101.6mm (for round handrail)	0.07 ea.
Split Tube, 38.1mm x 203.2mm (for round handrail)	0.14 ea.
Round Connector, 38.1mm x 203.2mm	0.24 ea.
3.18mm x 38.1mm Tension Pins	0.02 / 10 pcs.
FRP Base Plate with Post, Total Height 1.00m (YFRPE)	2.49 / pc.
Stainless Steel Kickplate Bracket	0.05 ea.
6.35mm x 25.4mm Stainless Steel Bolt Assembly	0.02 ea.

CHANNEL TOP RAILING SYSTEM COMPONENTS

For more information on the Channel Top option, please refer to the SAFRAIL™ brochure.

COMPONENT	
25.4mm Diameter Mid Rail, Yellow Polyester Fire Retardant, UV Coated	(1,524 linear meter min. run)
Channel Top Handrail, Yellow Polyester Fire Retardant, UV Coated	(1,524 linear meter min. run)
50.8mm x 50.8mm x 3.96mm Tube (for post), Yellow Polyester Fire Retardant, UV Coated	
101.6mm Kick Plate, Yellow Polyester Fire Retardant, UV Coated	



CUSTOM FIBERGLASS RAILING SYSTEMS

CUSTOM FABRICATED RAILING

Handrail may be ordered in custom colors and/or resins and may also be pre-fabricated. Prices and ship dates for custom fabricated handrail may be obtained by calling Strongwell Customer Service.

NOTE: Strongwell recommends a coating to reduce color fade for outdoor applications. If a coating is not applied, components may fade rapidly.

FIBERGLASS BAFFLE WALL PANELS

PANELS

WIDTH IN mm	LENGTH IN m	PE	kg PER LIN. m
304.8mm	-	NS	5.51
609.6mm	7.3	STOCKED	9.67

COMPOSOLITE®

FIBERGLASS BUILDING PANEL SYSTEM

PANEL SYSTEM COMPONENTS

COMPONENTS	LENGTH IN m	PE	PE/FR	VE/FR	kg PER LIN. m
Panel**	6.1 & 7.3	NS	STOCKED	NS	11.19
Toggle	6.1	NS	STOCKED	NS	0.49
3-Way Connector	6.1	NS	STOCKED	NS	2.53
Hanger	-	NS	NS	NS	2.31
45° Connector	-	NS	NS	NS	2.60
86.87mm x 33.02mm x 3.18mm Cap Channel *	6.1	NS	STOCKED	NS	0.89
93.09mm x 50.8mm x 6.35mm Structural Cap Channel	-	NS	NS	NS	1.93

* Also stocked in series 525 yellow, 6.10m lengths

DURASHIELD®

FIBERGLASS FOAM CORE BUILDING PANEL SYSTEM

PANELS

THICKNESS IN mm	PE	PE/FR	VE/FR	kg PER LIN. m
25.4	NS	NS	NS	3.27
76.2	NS	NS	NS	11.68

DURASHIELD HC®

FIBERGLASS HOLLOW CORE BUILDING PANEL SYSTEM

PANELS

THICKNESS IN mm	PE	PE/FR	VE/FR	kg PER LIN. m
25.4	NS	NS	NS	4.87

FIBERGLASS DECKING PRODUCTS

SAFPLANK®
FIBERGLASS INTERLOCKING DECKING SYSTEM

SAFDECK®
FIBERGLASS OVERLAPPING DECKING SYSTEM

STRONGDEK™
FIBERGLASS ARCHITECTURAL DECKING SYSTEM

DECKING PANELS

PANEL	LENGTH IN m	PE	PE/FR	VE/FR	kg PER LIN. m
304.8mm SAFPLANK®	6.1 & 7.3	NS	STOCKED	NS	3.72
609.6mm SAFPLANK®	6.1 & 7.3	NS	STOCKED	NS	7.44
914.4mm SAFPLANK HD® **	7.3	NS	STOCKED	NS	31.32
SAFDECK® **	7.3	NS	STOCKED	NS	5.58
STRONGDEK™ **	7.3	NS	STOCKED	NS	3.84

DECKING ACCESSORIES

SIZES IN mm	PE	PE/FR	VE/FR	kg PER LIN. m
55.88mm x 27.00mm x 14.30mm x 2.03mm Cap Channel	NS	NS	NS	0.36
STRONGDEK™ Starter Channel	NS	NS	NS	3.54

FIBRE ~~BOLT~~®
FIBERGLASS STUDS AND NUTS

STUDS

SIZES IN mm	LENGTH IN m	STUDS PER PACKAGE	PACKAGE WEIGHT (kg)
9.53	1.2	15	2.04
12.7	1.2	10	2.27
15.88	1.2	10	3.40
19.05	1.2	6	3.18
25.4	1.2	4	3.86

HEX NUTS

SIZES IN mm	NUTS PER PACKAGE	PACKAGE WEIGHT (kg)
9.53	100	0.68
12.7	100	0.91
15.88	100	1.72
19.05	25	1.36
25.4	25	1.36

HS ARMOR PANELS

FIBERGLASS BALLISTIC PANEL

UL LEVEL 1 (OFF WHITE)

PANEL		kg PER LIN. m
6.35mm x 0.91m x 2.44m	NS	12.11
6.35mm x 1.22m x 2.44m	NS	16.37
6.35mm x 0.91m x 3.05m	NS	12.11
6.35mm x 1.22m x 3.05m	NS	16.37

UL LEVEL 2 (OFF WHITE)

PANEL		kg PER LIN. m
8.89mm x 0.91m x 2.44m	NS	16.46
8.89mm x 1.22m x 2.44m	NS	21.31
8.89mm x 0.91m x 3.05m	NS	16.46
8.89mm x 1.22m x 3.05m	NS	21.31

UL LEVEL 3 (OFF WHITE)

PANEL		kg PER LIN. m
12.7mm x 0.91m x 2.44m	NS	23.36
12.7mm x 1.22m x 2.44m	STOCKED	32.29
12.7mm x 0.91m x 3.05m	NS	23.36
12.7mm x 1.22m x 3.05m	NS	32.29

GENERAL INFORMATION

EXTREN® SERIES 500

An all-purpose series utilizing a premium polyester resin system with a UV inhibitor.

Color: olive green

EXTREN® SERIES 525

An all-purpose series utilizing a fire retardant premium polyester resin system with a UV inhibitor.

Color: slate gray (plus certain handrail and fixed ladder components in yellow)

EXTREN® SERIES 625

A premium series — both fire retardant and highly corrosion resistant — utilizing a vinyl ester resin system with a UV inhibitor.

Color: beige

Note 1: Any Series 500, 525 and 625 EXTREN® product can be manufactured upon request to meet the mechanical and physical properties of BS EN 13706 (E23) European standards (minimum quantities may apply). All standard EXTREN® products meet and/or exceed the structural requirements of E17 European standards.

Note 2: EXTREN® products can be produced to meet NSF potable water standards. Minimum quantities may apply.

STOCKED ITEMS

Carried in inventory, no minimum quantity required.

LENGTHS CUT FROM STOCK: Special lengths can be cut from stock shapes and rods. Plate can be cut to size desired from 1.22m x 2.44m stock. A fabrication cutting charge will be applied.

NONSTOCKED ITEMS

Tooling available. Check for possible availability.

SMALL QUANTITIES OF NONSTOCKED ITEMS: These are occasionally available because of overruns. Purchaser having a requirement for small quantities of nonstocked items should inquire about current inventory status. Such items are subject to prior sale, so delivery cannot be guaranteed.

MILL RUN

SPECIAL MILL RUN VARIANCE: The pultrusion process does not lend itself to producing exact quantities. Mill runs may vary 10%. If minimum quantities are required, orders should be placed considering these variances.

MINIMUM ORDER VALUE

Minimum order value is \$250.

COLORS

Special colors are available for shapes and plate. Extra cost will vary, depending on cost, amount of pigment required, and standards of acceptability. Minimum quantities may apply.

SPECIAL RESINS AND FORMULAE

Special resins and resin mixes will be quoted specifically after resin mix has been tested for adaptability to the production process involved.

PACKAGING

If other than standard packaging is required, contact Customer Service for additional costs.

TERMS

All products are manufactured in accordance to tolerance properties as published in Strongwell's *Design Manual*. Strongwell's Standard Terms and Condition of Sale apply. F.O.B./Ex Works dispatch location.



ISO 9001 Quality Certified Manufacturing Plants



BRISTOL LOCATION
400 Commonwealth Ave.
Bristol, VA 24201 USA
(276) 645-8000

CHATFIELD LOCATION
1610 Highway 52 South
Chatfield, MN 55923-9799 USA
(507) 867-3479
www.strongwell.com

HIGHLANDS LOCATION
26770 Newbanks Road
Abingdon, VA 24210 USA
(276) 645-8000

ST1018
© 2018 Strongwell



FRP Specifications

Section 06 71 00 Fiberglass Reinforced Polymer (FRP) Structural Shapes/Plate and Fabrications

REVISED 07.2019

BRISTOL FACILITY

400 Commonwealth Ave., Bristol, VA 24201 USA
(276) 645-8000

HIGHLANDS FACILITY

26770 Newbanks Road, Abingdon, VA 24210 USA
(276) 645-8000

CHATFIELD FACILITY

1610 Highway 52 South, Chatfield, MN 55923-9799 USA
(507) 867-3479

www.strongwell.com

Liability Disclaimer

The specifications and material property information contained in these STRONGWELL SPECIFICATIONS are provided as a service to architects and Design Engineers who desire to use this information in the creation of construction specification documents. The use of these specifications is at your own risk. These specifications may contain errors, omissions, and inaccuracies. NEITHER STRONGWELL NOR ANY OTHER PARTY INVOLVED IN THE CREATION OF THESE SPECIFICATIONS SHALL BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL, OR PUNITIVE DAMAGES ARISING OUT OF OR CONNECTED IN ANY MANNER WITH YOUR ACCESS TO OR USE OF THESE STRONGWELL SPECIFICATIONS INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, ANY LOST PROFITS, BUSINESS INTERRUPTION, OR LOSS OF PROGRAMS OR INFORMATION, EVEN IF STRONGWELL HAS BEEN SPECIFICALLY ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES. WITHOUT LIMITING THE FOREGOING, EVERYTHING IN THESE SPECIFICATIONS IS PROVIDED TO YOU "AS IS" WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EITHER EXPRESSED OR IMPLIED INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, TITLE, NONINFRINGEMENT AND FREEDOM FROM COMPUTER VIRUS.

Strongwell reserves the right to change its website at any time, including these STRONGWELL SPECIFICATIONS, as well as the terms and conditions of its website, and you will be bound by the terms of any such changes. In this regard, we suggest that you refer to Strongwell's website terms and conditions periodically so that you are aware of any changes.

Table of Contents

PART 1: GENERAL

1.01	Related Documents	3
1.02	Summary.....	3
1.03	Scope of Work	3
1.04	Quality Assurance	3
1.05	Design Criteria	3
1.06	Submittals	4
1.07	Shipping and Storage Instructions	4

PART 2: PRODUCTS

2.01	General	5
2.02	FRP Structural Shapes and Plate	6-8

PART 3: EXECUTION

3.01	Preparation	9
3.02	Inspection and Testing.....	9
3.03	Installation, General	9
3.04	All FRP Installation.....	9

SECTION 06 71 00

FIBERGLASS REINFORCED POLYMER (FRP) PRODUCTS AND FABRICATIONS

PART 1 – GENERAL

1.01 RELATED DOCUMENTS:

- A. Drawings and general provisions of Contract, including General and Supplementary Conditions and Division-1 Specification Sections, apply to work of this section.

1.02 SUMMARY:

- A. This section includes FRP Products & Fabrications for Structural Shapes and Plate.

1.03 SCOPE OF WORK:

- A. Furnish all labor, materials, equipment and incidentals governed by this section necessary to install the fiberglass reinforced polymer (FRP) products as specified herein.

1.04 QUALITY ASSURANCE:

- A. The material covered by these specifications shall be furnished by an ISO-9001 certified manufacturer of proven ability who is regularly engaged in the manufacture, fabrication and installation of FRP systems.
- B. Substitution of any component or modification of system shall be made only when approved by the Architect or Design Engineer.
- C. Fabricator Qualifications: Firm experienced in successfully producing FRP fabrications similar to that indicated for this project, with sufficient production capacity to produce required units without causing delay in the work.
- D. In addition to requirements of these specifications, comply with manufacturer's instructions and recommendations for work.

1.05 DESIGN CRITERIA:

- A. The design of EXTREN® structural shapes and plate, including connections, shall be in accordance with governing building codes and standards as applicable.
- B. Structural members shall be designed to support all applied loads. Deflection in any direction shall not be more than L/180 of span for structural members unless specifically stated otherwise in drawings and/or supplementary conditions. Connections shall be designed to transfer the loads.

1.06 SUBMITTALS:

- A. Shop drawings of all structural shapes and plate shall be submitted to the Design Engineer for approval in accordance with the requirements of Section _____. Fabrication shall not start until receipt of Design Engineer's approval marked "Approved As Submitted" or "Approved As Noted".
- B. Detail shop drawings showing:
 - 1. Dimensions
 - 2. Sectional assembly
 - 3. Location and identification mark
 - 4. Size and type of supporting frames required
- C. Samples of each type of product shall be submitted for approval in accordance with the requirements of Section _____.

1.07 SHIPPING AND STORAGE INSTRUCTIONS:

- A. All systems, sub-systems and structures shall be shop fabricated and assembled into the largest practical size suitable for transporting.
- B. All materials and equipment necessary for the fabrication and installation of structural shapes and plate and appurtenances shall be stored before, during, and after shipment in a manner to prevent cracking, twisting, bending, breaking, chipping or damage of any kind to the materials or equipment, including damage due to over exposure to the sun. Any material which, in the opinion of the Design Engineer, has become damaged as to be unfit for use, shall be promptly removed from the site of work, and the Contractor shall receive no compensation for the damaged material or its removal.
- C. Identify and match-mark all materials, items and fabrications for installation and field assembly.

PART 2 – PRODUCTS

2.01 GENERAL:

- A. Materials used in the manufacture of the FRP products shall be raw materials in conformance with the specification and certified as meeting the manufacturer's approved list of raw materials.
- B. All raw materials shall be as specified by the contract.
- C. The visual quality of the pultruded shapes shall conform to ASTM D4385.
- D. All FRP products noted in 1.02 shall be manufactured using a pultruded process utilizing _____ (select isophthalic polyester or vinyl ester) resin with flame retardant and ultraviolet (UV) inhibitor additives. A synthetic surface veil fabric shall encase the glass reinforcement. FRP shapes shall achieve a flame spread rating of 25 or less in accordance with ASTM test method E-84, the flammability characteristics of UL 94 V0 and the self-extinguishing requirements of ASTM D635. All structural shapes shall contain a UV inhibitor.
- E. If specified, after fabrication, all cut ends, holes and abrasions of FRP shapes shall be sealed with a compatible resin coating.
- F. FRP products exposed to weather shall contain an ultraviolet inhibitor. Should additional ultraviolet protection be required, a one mil minimum UV coating can be applied.
- G. All exposed surfaces shall be smooth and true to form, consistent with ASTM D4385.
- H. Manufacturers:
 - 1. Strongwell
- I. Pultruded FRP products shall be manufactured and fabricated in the USA. Manufacturer shall provide a written Certificate of Compliance.
- J. The materials covered by these specifications shall be furnished by an ISO-9001 certified manufacturer.

2.02 FRP STRUCTURAL SHAPES AND PLATE:

A. Material

1. Structural shapes and plate shall be made from _____ (select isophthalic polyester or vinyl ester) resin with fire retardant additives to meet a flame spread rating of less than 25 per ASTM E-84, the flammability characteristics of UL 94 V0 and meet the self-extinguishing requirements of ASTM D-635. All structural shapes shall contain a UV inhibitor.
2. Pultruded profiles shall satisfy the visual requirements of ASTM D4385.
3. Structural shapes and plate shall be EXTREN® as manufactured by Strongwell.

B. Process

1. Manufactured by the pultrusion process.

2.03 Structural FRP members' composition shall consist of a glass fiber reinforced isophthalic polyester or vinyl ester resin matrix and glass reinforcements. A synthetic surface veil fabric shall encase the glass reinforcement. Glass strand rovings shall be used internally for longitudinal strength. Continuous strand glass mats or stitched reinforcements shall be used internally for transverse strength.

**Table 1 – Fiberglass Pultruded Material Properties
Minimum Ultimate Coupon Properties**

PROPERTIES	ASTM TEST METHOD	UNITS/ VALUE	SERIES 500/525 SHAPES	SERIES 625 SHAPES	SERIES 500/525 PLATE ^④			SERIES 625 PLATE ^④		
					1/8"	3/16" -3/8"	1/2"-1"	1/8"	3/16"-1/4"	3/8"-1"
					3.175 mm	4.76-6.35 mm	9.5-25.4 mm	3.175 mm	4.76-6.35 mm	9.5-25.4 mm
MECHANICAL										
Tensile Stress, LW	D638	psi	30,000	30,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
		N/mm ²	207	207	138	138	138	138	138	138
Tensile Stress, CW	D638	psi	7,000	7,000	7,500	10,000	10,000	7,500	10,000	10,000
		N/mm ²	48.3	48.3	51.7	68.9	68.9	51.7	68.9	68.9
Tensile Modulus, LW	D638	10 ⁶ psi	2.5	2.6	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
		10 ³ N/mm ²	17.2	17.9	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
Tensile Modulus, CW	D638	10 ⁶ psi	.8	.8	.7	.9	1	1	1	1
		10 ³ N/mm ²	5.52	5.52	4.83	6.21	6.89	6.89	6.89	6.89
Compressive Stress, LW	D695	psi	30,000	30,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
		N/mm ²	207	207	165	165	165	165	165	165
Compressive Stress, CW	D695	psi	15,000	16,000	15,500	16,500	20,000	16,500	17,500	17,500
		N/mm ²	103	110	107	114	138	114	121	121
Compressive Modulus, LW ^③	D695	10 ⁶ psi	2.5	2.6	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
		10 ³ N/mm ²	17.2	17.9	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
Compressive Modulus, CW	D695	10 ⁶ psi	0.8	0.8	0.7	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
		10 ³ N/mm ²	5.52	5.52	4.83	6.21	6.89	6.89	6.89	6.89
Flexural Stress, LW	D790	psi	30,000	30,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
		N/mm ²	207	207	241	241	207	241	241	207
Flexural Stress, CW	D790	psi	10,000	10,000	10,000	13,000	17,000	10,000	13,000	17,000
		N/mm ²	68.9	68.9	89.6	103	124	89.6	103	124
Flexural Modulus, LW ^③	D790	10 ⁶ psi	1.6	1.6	1.1	1.1	1.4	1.1	1.1	1.4
		10 ³ N/mm ²	11.0	11.0	7.58	7.58	9.65	7.58	7.58	9.65
Flexural Modulus, CW	D790	10 ⁶ psi	0.8	0.8	0.8	0.8	1.3	0.8	0.9	1.3
		10 ³ N/mm ²	5.52	5.52	5.51	5.51	8.96	5.51	6.21	8.96
Modulus of Elasticity ^①	full section	10 ⁶ psi	2.6	2.8						
		10 ³ N/mm ²	17.9	19.3						
Modulus of Elasticity >4" ^① >102 mm	full section	10 ⁶ psi	2.5	2.5						
		10 ³ N/mm ²	17.2	17.2						
Shear Modulus, LW ^{②⑦}	—	10 ⁶ psi	.425	.425						
		10 ³ N/mm ²	2.93	2.93						
Short Beam Shear, LW ^{⑥⑦}	D2344	psi	4,500	4,500						
		N/mm ²	31.0	31.0						
Ultimate Bearing Stress, LW	D953	psi	30,000	30,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000
		N/mm ²	207	207	220.6	221	221	221	221	221
Poisson's Ratio, LW ^⑦	D3039	in/in	.33	.33	.31	.31	.31	.32	.32	.32
		mm/mm	.33	.33	.31	.31	.31	.32	.32	.32
Notched Izod Impact, LW	D256	ft-lbs/in	25	25	15	10	10	15	10	10
		J/mm	1.33	1.33	.801	.533	.533	.801	.533	.533
Notched Izod Impact, CW	D256	ft-lbs/in	4	4	5	5	5	5	5	5
		J/mm	.214	.214	.267	.267	.267	.267	.267	.267

**Table 1 – Fiberglass Pultruded Material Properties
Minimum Ultimate Coupon Properties – cont'd**

PROPERTIES	ASTM TEST METHOD	UNITS/ VALUE	SERIES 500/525 SHAPES	SERIES 625 SHAPES	SERIES 500/525 PLATE ^④			SERIES 625 PLATE ^④		
					1/8"	3/16 -3/8"	1/2"-1"	1/8"	3/16"-1/4"	3/8"-1"
					3.175 mm	4.76-6.35 mm	9.5-25.4 mm	3.175 mm	4.76-6.35 mm	9.5-25.4 mm
PHYSICAL										
Barcol Hardness ^④	D2583	—	45	45	40	40	40	40	40	40
24 HR Water Absorption ^⑤	D570	% Max by wt	.6	.6	.6	.6	.6	.6	.6	.6
Density	D792	lbs/in ³ 10 ⁻³ g/mm ³	.062-.070 1.72-1.94	.062-.070 1.72-1.94	.060-.068 1.66-1.88	.060-.068 1.66-1.88	.060-.068 1.66-1.88	.060-.068 1.66-1.88	.060-.068 1.66-1.88	.060-.068 1.66-1.88
Coefficient of Thermal Expansion, LW ^⑦	D696	10 ⁻⁶ in/in/°F 10 ⁻⁵ mm/mm/°C	7.0 1.2	7.0 1.2	8.0 1.45	8.0 1.45	8.0 1.45	8.0 1.45	8.0 1.45	8.0 1.45
Thermal Conductivity ^⑦	C177	BTU-in/ ft ² /hr/°F W (m * °K)	4 .58	4 .58						
ELECTRICAL										
Arc Resistance, LW ^⑦	D495	seconds	120	120						
Dielectric Strength, LW ^⑦	D149	KV/in KV/mm	35 1.38	35 1.38	35 1.38	35 1.38	35 1.38	35 1.38	35 1.38	35 1.38
Dielectric Strength, PF ^⑧	D149	volts/mil	200	200	200	N.T.	N.T.	250	N.T.	N.T.
FLAMMABILITY^④ (≥1/8" thickness)										
Tunnel Test	E-84	25 Max								
NBS Smoke Chamber	E-662	650-700 (typical)								
Flammability	UL 94	V0								
Flammability	D635	Self Extinguishing								
UL Thermal Index	Generic	130°C								
British Fire Test	BS 476-7	Class 1								

All values are minimum ultimate properties from coupon tests except as noted.

① This value is determined from full section simple beam bending of EXTREN® structural shapes.

② The Shear Modulus value has been determined from tests with full sections of EXTREN® structural shapes.
(See the Strongwell *Design Manual* for further information.)

③ Plate compressive stress/modulus measured edgewise and flexural stress/modulus measured flatwise.

④ Values apply to Series 525 and 625.

⑤ Measured as a percentage maximum by weight.

⑥ Span to depth ratio of 3:1; EXTREN® angles will have a minimum value of 4,000 psi and the I/W shapes are tested in the web.

⑦ Typical values

⑧ This is a typical value which varies with composite thickness.

LW = Lengthwise

CW = Crosswise

PF = Perpendicular to laminate face

N.T. = Not Tested

PART 3 – EXECUTION

3.01 PREPARATION:

- A. Coordinate and furnish setting drawings, diagrams, and templates for all FRP material. Provide instructions for installation of concrete inserts, sleeves, and miscellaneous items having integral anchors that are to be embedded in concrete or masonry construction.
- B. Coordinate delivery of such items to project site.

3.02 INSPECTION AND TESTING:

- A. The Design Engineer shall have the right to inspect all materials to be furnished under these specifications prior to their shipment from the point of manufacture.
- B. All labor, power, materials, equipment and appurtenances required for testing shall be furnished by the Contractor at no cost to the Owner.

3.03 INSTALLATION, GENERAL:

- A. Fastening to in-place construction: Provide anchorage devices and fasteners where necessary for securing miscellaneous FRP fabrications to in-place construction; include threaded fasteners for concrete and masonry inserts, toggle bolts, through-bolts, lag bolts and other connectors as determined by the Design Engineer of Record.
- B. Cutting, fitting and placement: Perform cutting, drilling and fitting required for installation of miscellaneous FRP fabrications. Set FRP fabrication accurately in location, alignment and elevation; with edges and surfaces level, plumb, true and free of rack; measured from established lines and levels.
- C. Provide temporary bracing or anchors in form work for items that are to be built into concrete masonry or similar construction.

3.04 ALL FRP INSTALLATION:

- A. If required, all field cut and drilled edges, holes and abrasions shall be sealed with a catalyzed resin compatible with the original resin as recommended by the manufacturer.
- B. Install items specified as indicated and in accordance with manufacturer's instructions.

End of Section 06600

B.2.2 Critères ELS - Sorties RSA

Flèches maximales de la poutre centrale

Bar/Case	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
201/ 1	0,1	0,0	-12,1
201/ 2	0,2	0,0	-42,8
201/ ULS+	0,4	0,0	-12,1
201/ ULS-	0,1	0,0	-86,6
201/ SLS+	0,3	0,0	-12,1
201/ SLS-	0,1	0,0	-58,9
201/ SLS:CHR+	0,3	0,0	-12,1
201/ SLS:CHR-	0,1	0,0	-58,9
201/ SLS:FRE+	0,2	0,0	-12,1
201/ SLS:FRE-	0,1	0,0	-35,5
201/ SLS:QPR+	0,1	0,0	-12,1
201/ SLS:QPR-	0,1	0,0	-26,2
201/ FEU+	0,2	0,0	-12,1
201/ FEU-	0,1	0,0	-35,5

FIGURE B.1 – Le cas de charge 2 représente les charges variables

Fréquences propres de la passerelle

Case/Mode	Frequency (Hz)	Period (sec)	Rel.mas.UX (%)	Rel.mas.UY (%)	Rel.mas.UZ (%)	Cur.mas.UX (%)	Cur.mas.UY (%)	Cur.mas.UZ (%)	Total mass UX (kg)	Total mass UY (kg)	Total mass UZ (kg)
21/ 1	6.50	0.15	0.13	0.00	78.34	0.13	0.00	78.34	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 2	8.86	0.11	0.13	6.03	78.34	0.00	6.03	0.00	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 3	16.95	0.06	0.19	6.03	78.34	0.06	0.00	0.00	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 4	17.41	0.06	0.26	6.03	78.75	0.07	0.00	0.41	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 5	19.50	0.05	0.26	64.98	78.75	0.00	58.95	0.00	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 6	23.37	0.04	0.26	66.32	78.75	0.00	1.34	0.00	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 7	24.78	0.04	0.53	66.32	78.84	0.27	0.00	0.09	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 8	25.22	0.04	0.53	66.32	80.82	0.00	0.00	1.98	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 9	28.20	0.04	0.53	67.35	80.82	0.00	1.03	0.00	5548,11	5548,11	5548,11
21/ 10	28.57	0.03	0.53	67.42	80.82	0.00	0.07	0.00	5548,11	5548,11	5548,11

B.2.3 Critères ELU - Sorties RSA

	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)	TY (MPa)	TZ (MPa)
MAX	60.21	46.14	28.28	8.79	-0.00	0.0	50.37	1.55	5.66
Bar	151	151	121	3	76	5	155	34	123
Node	88	86	71	1	50	71	88	22	74
Case	ULS/1	ULS/1	ULS/1	ULS/1	1	1	ULS/1	ULS/1	ULS/1
MIN	-7.26	-38.60	0.00	0.0	-28.28	-8.79	-19.42	-1.55	-4.83
Bar	122	126	76	5	121	3	122	269	120
Node	74	75	50	71	71	1	74	165	72
Case	ULS/1	ULS/1	1	1	ULS/1	ULS/1	ULS/1	ULS/1	ULS/1

FIGURE B.2 – Résumé des contraintes maximales dans les différentes sections de la passerelle

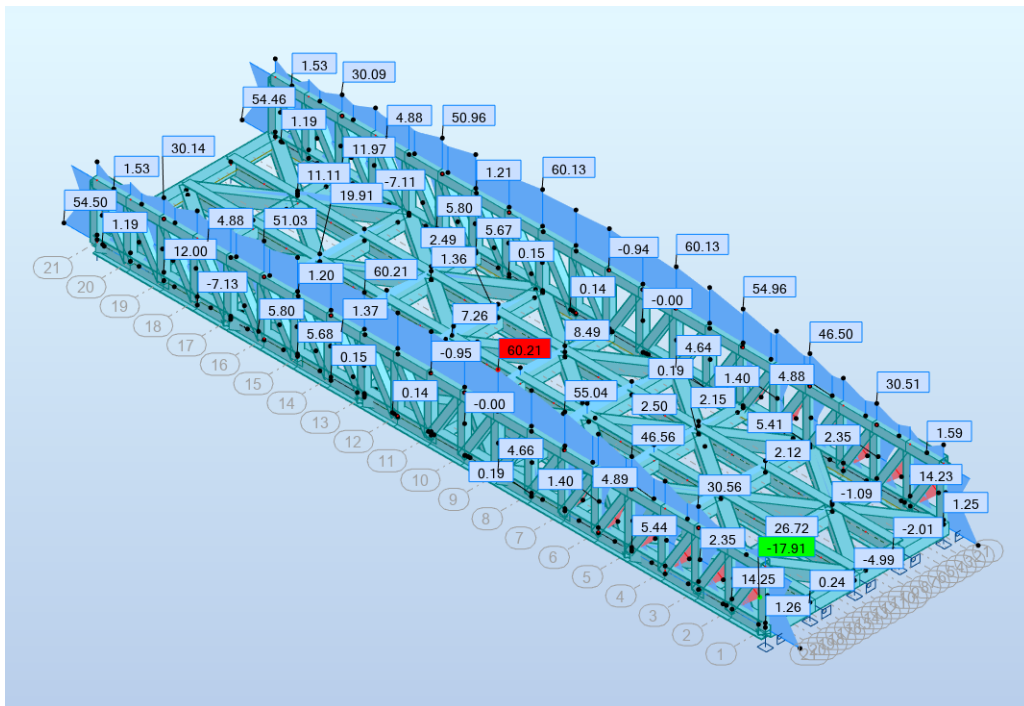


FIGURE B.3 – σ_{max} à l'ELU

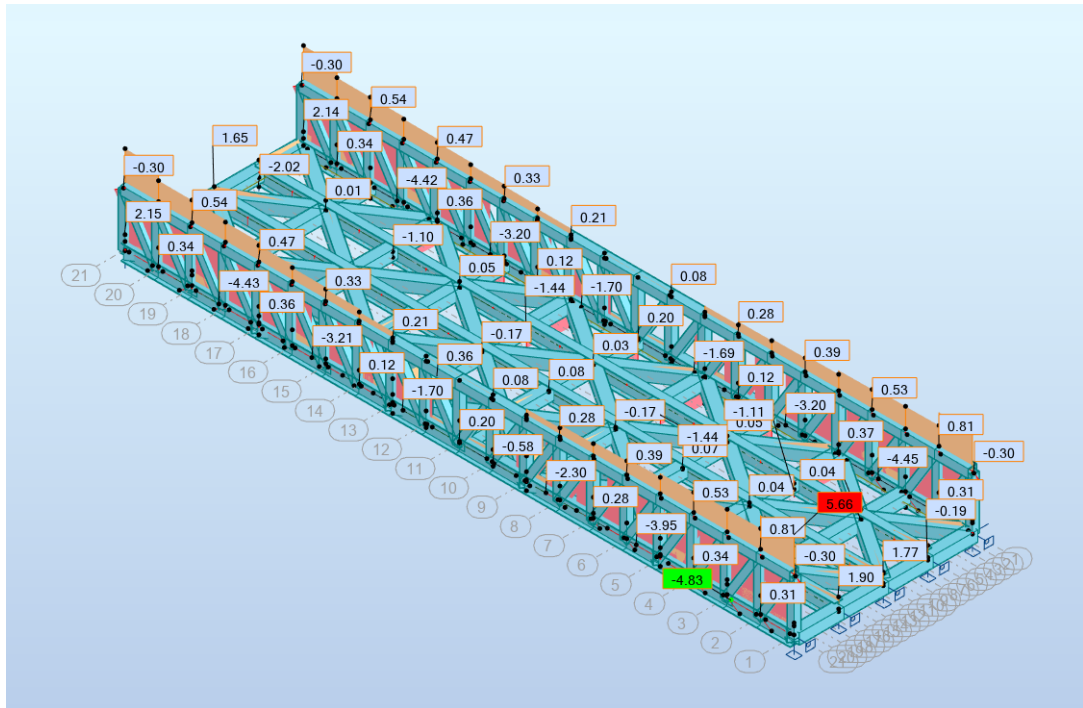


FIGURE B.4 – τ_{max} à l'ELU

B.3 Solution Composite 2

B.3.1 Critères ELS - CUR96 - Sorties RSA

	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
MAX	0,0	0,0	-13,3
Bar	1	10	9
Case	SLS/1	SLS/1	SLS/2
MIN	0,0	-0,0	-80,8
Bar	1	1	10
Case	SLS/2	SLS/1	SLS/1

FIGURE B.5 – Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de 50cm de haut

	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
MAX	0,0	0,0	-11,1
Bar	1	10	9
Case	SLS/1	SLS/1	SLS/2
MIN	0,0	-0,0	-65,9
Bar	1	1	10
Case	SLS/2	SLS/1	SLS/1

FIGURE B.6 – Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de 55cm de haut

	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
MAX	0,0	0,0	-9,3
Bar	1	10	9
Case	SLS/1	SLS/1	SLS/2
MIN	0,0	-0,0	-54,7
Bar	1	1	10
Case	SLS/2	SLS/1	SLS/1

FIGURE B.7 – Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de 60cm de haut

	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
MAX	0,0	0,0	-10,0
Bar	1	10	9
Case	SLS/1	SLS/1	SLS/2
MIN	0,0	-0,0	-58,8
Bar	1	1	10
Case	SLS/2	SLS/1	SLS/1

FIGURE B.8 – Flèches maximales à l'ELS pour un tablier de 58cm de haut

	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
MAX	0,0	0,0	-33,6
Bar	1	10	9
Case	2	2	2
MIN	0,0	-0,0	-42,6
Bar	5	1	10
Case	2	2	2

FIGURE B.9 – Flèches sous charges variables pour un tablier de 58cm de haut

Case/Mode	Frequency (Hz)	Period (sec)	Rel.mas.UX (%)	Rel.mas.UY (%)	Rel.mas.UZ (%)	Cur.mas.UX (%)	Cur.mas.UY (%)	Cur.mas.UZ (%)	Total mass UX (kg)	Total mass UY (kg)	Total mass UZ (kg)
21/ 1	4.79	0.21	0.00	0.00	80.89	0.00	0.00	80.89	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 2	5.62	0.18	0.00	0.00	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 3	7.42	0.13	0.00	0.00	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 4	9.16	0.11	0.00	75.21	80.89	0.00	75.21	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 5	9.53	0.10	0.00	75.21	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 6	11.97	0.08	0.00	75.21	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 7	14.80	0.07	0.00	75.21	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 8	17.90	0.06	0.00	75.21	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 9	19.10	0.05	0.00	75.21	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49
21/ 10	19.84	0.05	0.00	75.21	80.89	0.00	0.00	0.00	9983.49	9983.49	9983.49

FIGURE B.10 – Fréquences propre de la passerelle pour un tablier de 58cm de haut

B.3.2 Critères ELU - CUR96 - Sorties RSA

	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)	TY (MPa)	TZ (MPa)
MAX	20.20	0.09	20.20	0.00	-0.00	0.0	0.09	0.00	6.26
Bar	10	10	10	1	7	1	10	10	1
Point	0.50	20	0.50	1	26	1	20	20	1
Case	ULS/1	ULS/3	ULS/1	ULS/1	SLS/3	1	ULS/1	ULS/1	ULS/1
MIN	-0.09	-20.20	0.00	0.0	-20.20	-0.00	-0.09	-0.00	-6.27
Bar	10	10	7	1	10	1	1	1	10
Point	19	0.50	26	1	0.50	1	1	2	20
Case	ULS/3	ULS/1	SLS/3	1	ULS/1	ULS/1	ULS/1	ULS/1	ULS/1

FIGURE B.11 – Résumé des contraintes maximales dans les différents sections de la passerelle

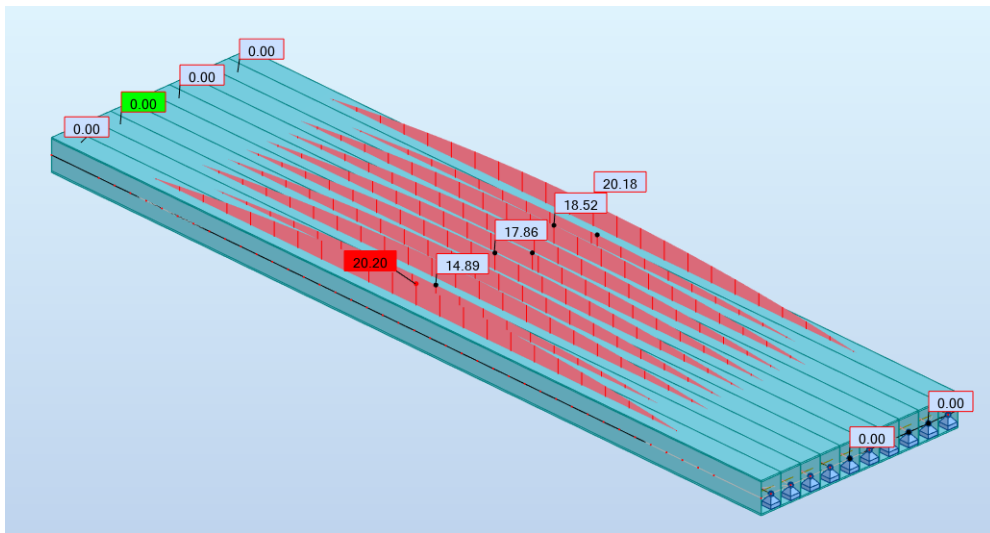


FIGURE B.12 – σ_{max} à l'ELU

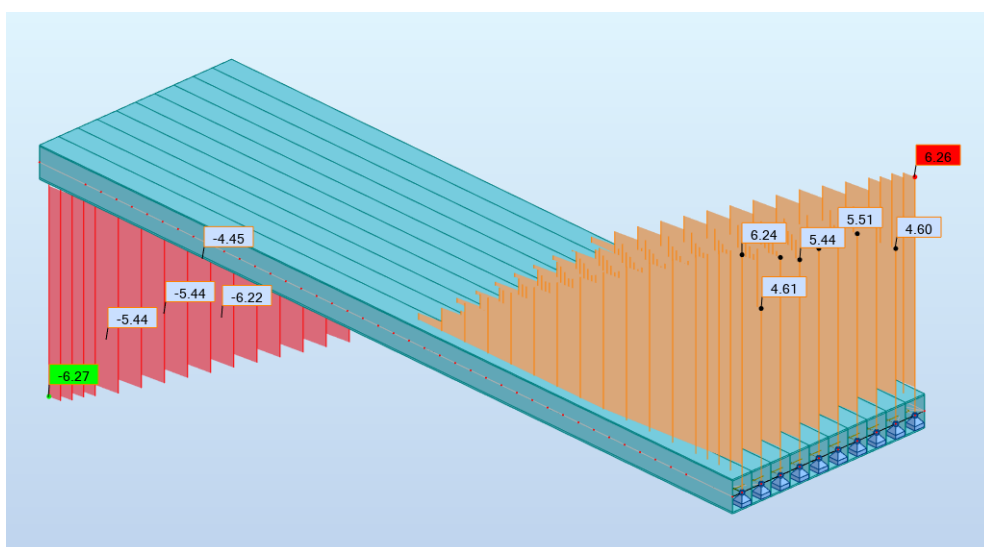


FIGURE B.13 – τ_{max} à l'ELU

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl